

# CVD-Umsetzung im ÖPNV des Landes Brandenburg

Bericht

Stand, April 2023



Auftraggeber:  
**VDV-Landesgruppe Ost**

Leipziger Platz 8  
10117 Berlin

[www.vdv.de/ost.aspx](http://www.vdv.de/ost.aspx)

Auftragnehmer:  
**VCDB VerkehrsConsult  
Dresden-Berlin GmbH**

## Standort Berlin

Uhlandstraße 97  
10715 Berlin

Tel.: +49 .30 .23 63 19-41

Fax: +49 .30 .23 63 19-49

E-Mail: [berlin@vcdb.de](mailto:berlin@vcdb.de)

## Standort Dresden

Könneritzstraße 31

01067 Dresden

Tel.: +49 .351 .4 82 31-00

Fax: +49 .351 .4 82 31-09

E-Mail: [dresden@vcdb.de](mailto:dresden@vcdb.de)

Internet: [www.vcdb.de](http://www.vcdb.de)

Ansprechpartner:  
**Dr. Alexander Bunzel**  
[a.bunzel@vcdb.de](mailto:a.bunzel@vcdb.de)



## Inhaltsverzeichnis

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Hintergrund.....   | 10 |
| 1.1   | Zielstellung.....  | 10 |
| 1.2   | Clean Vehicles Directive .....                               | 10 |
| 2     | Technologische Grundlagen .....                              | 14 |
| 2.1   | Elektrische Antriebskonzepte .....                           | 14 |
| 2.1.1 | Elektrischer Antrieb .....                                   | 14 |
| 2.1.2 | Hybridantrieb .....  | 22 |
| 2.1.3 | Antriebssystem .....   | 23 |
| 2.1.4 | Energiespeicher .....  | 25 |
| 2.1.5 | Heizungs- und Klimatisierungskonzept .....                   | 28 |
| 2.2   | Versorgungsinfrastruktur .....                               | 32 |
| 2.2.1 | Elektrische Energiebereitstellung.....                       | 33 |
| 2.2.2 | Chemische Energiebereitstellung .....                        | 41 |
| 3     | Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg...       | 47 |
| 3.1   | Methodik.....  | 47 |
| 3.1.1 | Erhebungsbogen.....  | 47 |
| 3.1.2 | Ablauf der Erhebung.....                                     | 47 |
| 3.2   | Datenauswertung .....  | 48 |
| 3.2.1 | Fahrzeugbestand .....  | 48 |
| 3.2.2 | Fahrzeugbeschaffung .....                                    | 48 |
| 3.2.3 | Infrastrukturbestand .....                                   | 51 |
| 3.2.4 | Infrastruktur in Planung.....                                | 51 |
| 3.3   | Synergieeffekte – gemeinsame Nutzung von Infrastruktur ..... | 52 |
| 3.4   | Beschaffungs- und Umrüstungsbedarf .....                     | 57 |
| 3.4.1 | Beschaffungsbedarf Fahrzeuge.....                            | 57 |

## Hintergrund

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.4.2 | Umrüstungsbedarf Lade- und Tankinfrastruktur .....                            | 57 |
| 3.4.3 | Erweiterungsbedarf der Werkstätten, Betriebsstätten und<br>Betriebshöfe ..... | 59 |
| 3.5   | Investitionskosten Fahrzeuge.....   | 60 |
| 3.5.1 | Förderbedarf.....   | 60 |
| 3.6   | Investitionskosten Infrastruktur .....  | 61 |
| 3.6.1 | Ladeinfrastruktur.....  | 61 |
| 3.6.2 | Wasserstoff-Tankstellen .....   | 63 |
| 3.6.3 | Werkstätten, Betriebsstätten und Betriebshöfe.....                            | 64 |
| 3.6.4 | Planungszeithorizonte: Infrastruktur vs. Fahrzeug.....                        | 65 |
| 4     | Zusammenfassung und Ausblick .....  | 66 |
|       | Anlagen .....   | 68 |

## Abbildungsverzeichnis

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| Abbildung 1.1:  | Beschaffungsquoten der CVD .....   | 11 |
| Abbildung 2.1:  | Konfigurationsmöglichkeiten Elektrobus .....   | 14 |
| Abbildung 2.2:  | Prinzip Batteriebus .....  | 16 |
| Abbildung 2.3:  | Kategorisierung von Brennstoffzellenbussen .....   | 20 |
| Abbildung 2.4:  | Hybride Fahrzeugkonzepte Bsp. Diesel-/Erdgas-Bus .....   | 23 |
| Abbildung 2.5:  | Antriebsstrang Zentralmotor .....  | 24 |
| Abbildung 2.6:  | Antriebsstrang radnaher Motor .....  | 25 |
| Abbildung 2.7:  | Antriebsstrang Radnabenmotor .....   | 25 |
| Abbildung 2.8:  | Schematische Darstellung der Funktionsweise einer<br>Wasserstoffbrennstoffzelle .....                  | 27 |
| Abbildung 2.9:  | Spezifischer Heizenergiebedarf eines Standardbusses .....  | 28 |
| Abbildung 2.10: | Energiebilanz Dieselbus .....  | 29 |
| Abbildung 2.11: | Energiebilanz von Batterie- und Brennstoffzellenbus .....  | 29 |
| Abbildung 2.12: | Versorgungsinfrastruktur für elektrisch angetriebene<br>Busse .....                                    | 32 |
| Abbildung 2.13: | Stromabnehmer bei Oberleitungsbussen .....   | 35 |
| Abbildung 2.14: | Oberleitungsbus Salzburg .....   | 37 |
| Abbildung 2.15: | Hub-Docking-Station .....  | 38 |
| Abbildung 2.16: | Senk-Docking-Station .....   | 39 |
| Abbildung 2.17: | Belegung Combo-2-Kupplung und -Stecker nach<br>IEC 62196 .....   | 40 |
| Abbildung 2.18: | Stationäre Energiezuführung [Daimler] .....  | 40 |
| Abbildung 2.19: | Tankkupplung für Wasserstoff mit IR-Kommunikation<br>[weh.de/produkte] .....                           | 43 |
| Abbildung 2.20: | Typische Elemente einer Wasserstofftankstelle [Volker<br>Watschounek] .....                            | 44 |
| Abbildung 2.21: | Schematische Darstellung der Wasserstoffelektrolyse .....  | 45 |
| Abbildung 3.1:  | Verteilung der Fahrzeugbeschaffung nach Jahresscheiben ....  | 50 |
| Abbildung 3.2:  | Darstellung des geplanten Wasserstoffnetzes<br>[doinghydrogen.com] .....                               | 53 |
| Abbildung 3.3:  | Projekte mit Wasserstoffbezug in der Region Berlin-<br>Brandenburg [localiser.de/h2marktplatzbb] ..... | 55 |
| Abbildung 0.1:  | Datenabfrage, Beispiel für Fahrzeugflotte Bestand und<br>Ersatzbeschaffung .....                       | 69 |

---

## Hintergrund

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| Abbildung 0.2: | Datenabfrage, Erklärung für Dropdown-Felder .....          | 70 |
| Abbildung 0.3: | Datenabfrage, Beispiel für Infrastruktur Betriebshof ..... | 71 |
| Abbildung 0.4: | Datenabfrage, Beispiel für geplante Infrastruktur .....    | 71 |

## Tabellenverzeichnis

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Tabelle 1:   | Investitionskosten Oberleitungsbus.....  | 16 |
| Tabelle 2:   | Investitionskosten Batteriebus .....   | 20 |
| Tabelle 3:   | Charakteristika Brennstoffzellenbus .....  | 21 |
| Tabelle 4:   | Vergleich gravimetrischer Energiedichten .....   | 26 |
| Tabelle 5:   | Fahrzeugenergiebedarf unterschiedlicher<br>Antriebskonzepte .....                        | 30 |
| Tabelle 6:   | CVD-Konformität der befragten Unternehmen bzgl. der<br>Beschaffung .....                 | 49 |
| Tabelle 7:   | Fahrzeugbeschaffung für die Jahre 2021-2023 .....  | 50 |
| Tabelle 8:   | Windkraft- und Photovoltaikanlagen der Landkreise<br>[Energieatlas Brandenburg] .....    | 56 |
| Tabelle 9:   | Anzahl auszumusternde Fahrzeuge in Jahresscheiben und<br>nach CVD-Referenzzeitraum ..... | 57 |
| Tabelle 10:  | Fahrzeugförderbedarf bei Förderquote 80 %.....   | 61 |
| Tabelle 11:  | Förderbedarf der Ladeinfrastruktur .....   | 63 |
| Tabelle 12:  | Förderbedarf der Tankinfrastruktur .....   | 64 |
| Tabelle 13:  | Investitionsbedarf der Werkstätten, Betriebsstätten und<br>Betriebshöfe .....            | 65 |
| Tabelle 0.1: | Fahrzeugbeschaffung im 1. Referenzzeitraum .....   | 72 |
| Tabelle 0.2: | Fahrzeugbeschaffung im 2. Referenzzeitraum.....  | 73 |
| Tabelle 0.3: | Fahrzeugbeschaffung nach dem 2. Referenzzeitraum .....                                   | 74 |

## Gender-Hinweis und Abkürzungsverzeichnis

### Gender-Hinweis

In diesem Bericht wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

| Abkürzung  | Erklärung  |
|------------|--|
| AC         | Alternating Current, Wechselstrom  |
| AFID       | Alternative Fuels Infrastructure Directive   |
| BEB        | Batteriebus  |
| BetrSichV  | Betriebssicherheitsverordnung  |
| BImSchG    | Bundesimmissionsschutzgesetz   |
| BMS        | Batteriemanagementsystem   |
| BMVI       | Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur  |
| BOB        | Batterie-Oberleitungsbus   |
| BZB        | Brennstoffzellenbus  |
| BZ-REX-Bus | Brennstoffzelle als Range Extender   |
| CNG        | Compressed Natural Gas, Erdgas   |
| COP        | Coefficient of Performance, Verhältnis von Wärme zur benötigten elektrischen Antriebsenergie               |
| CPV-Nummer | Common Procurement Vocabulary, schlüsselt Gegenstände eines Auftrags auf und ordnet ihnen feste Nummern zu |
| CVD        | Clean Vehicles Directive   |
| DARP       | Deutscher Aufbau- und Resilienzplan  |
| DC         | Direct Current, Gleichstrom  |
| DOD        | Depth of Discharge, Entladetiefe   |
| EER        | Energy Efficiency Ratio, Verhältnis von Kälte zur benötigten elektrischen Antriebsenergie                  |
| EFRE       | Europäischer Fonds für regionale Entwicklung   |
| EG         | Europäische Gemeinschaft   |
| FC         | Fuel Cell, Brennstoffzelle   |
| GtL        | Gas-to-Liquid, synthetischer Kraftstoff  |



## Tabellenverzeichnis

| Abkürzung                  | Erklärung  |
|----------------------------|--|
| kWh/kg                     | Einheit der gravimetrischen Energiedichte  |
| kWh/l                      | Einheit der volumetrischen Energiedichte   |
| LFP                        | Lithium-Eisenphosphat  |
| LIS                        | Ladeinfrastruktur  |
| LNG                        | Liquid Natural Gas, Flüssiggas   |
| LTO                        | Lithium-Titanat-Oxid   |
| MIL                        | Ministerium für Infrastruktur und Landesplanung  |
| NaNiCl                     | Natrium-Nickelchlorid  |
| NiMH                       | Nickel-Metallhydrid  |
| NMC                        | Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid  |
| Obus                       | Oberleitungsbus  |
| OEM                        | Original Equipment Manufacturer, Erstausrüster   |
| PE                         | Protective Earth, Schutzleiter   |
| PEMFC                      | Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen  |
| SaubFahrzeugBeschG         | Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz  |
| SOC                        | State of Charge, Ladezustand   |
| SOH                        | State of Health, Alterungszustand einer Batterie   |
| TED                        | Tenders Electronic Daily, Anzeiger für das öffentliche Auftragswesen in Europa                         |
| $\Delta T$ -Klimatisierung | Klimatisierungsregelung, Innentemperatur wird mit definiertem Unterschied zur Außentemperatur gehalten |
| VDV                        | Verband Deutscher Verkehrsunternehmen  |
| VNB                        | Verteilnetzbetreiber   |
| VU                         | Verkehrsunternehmen  |

## Hintergrund

# 1 Hintergrund

## 1.1 Zielstellung

Gegenstand des vorliegenden Berichts ist die Umsetzung der Clean Vehicles Directive (CVD) im öffentlichen Personennahverkehr im Land Brandenburg unter Einbezug von bereits angestoßenen und geplanten Beschaffungen.

Es wird eine Datenabfrage durchgeführt, an der sich ansässige Verkehrsunternehmen in Verbindung mit ihren Aufgabenträgern freiwillig beteiligen können. Die abgefragten Informationen behandeln die Umrüstungen der jeweiligen Busflotten sowie die zugehörigen Infrastrukturen und konzentrieren sich auf den Bestand, die Aussonderung sowie die geplanten Neuanschaffungen oder bereits definierte Projekte.

Aus den übermittelten Daten werden Aussagen zur Erfüllung der beiden definierten Referenzzeiträume generiert. Weiterhin werden zukünftige Fahrzeug- und Infrastrukturbeschaffungsbedarfe abgeschätzt und dazu notwendige Investitionskosten anhand marktüblicher Preise oder Hochrechnungen abgeleitet. Daraus werden final Förderbedarfe kalkuliert, die in den kommenden Jahren bis Ende 2030 im Land Brandenburg zu erwarten sind.

## 1.2 Clean Vehicles Directive

Die „Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge“ gibt für die EU-Mitgliedsstaaten Mindestziele für emissionsarme und -freie Pkw sowie leichte und schwere Nutzfahrzeuge einschließlich Bussen bei der öffentlichen Auftragsvergabe vor. Die zu erfüllenden Quoten für Deutschland bei der Beschaffung schwerer Nutzfahrzeuge einschließlich Bussen im ÖPNV sind in Abbildung 1.1 dargestellt.

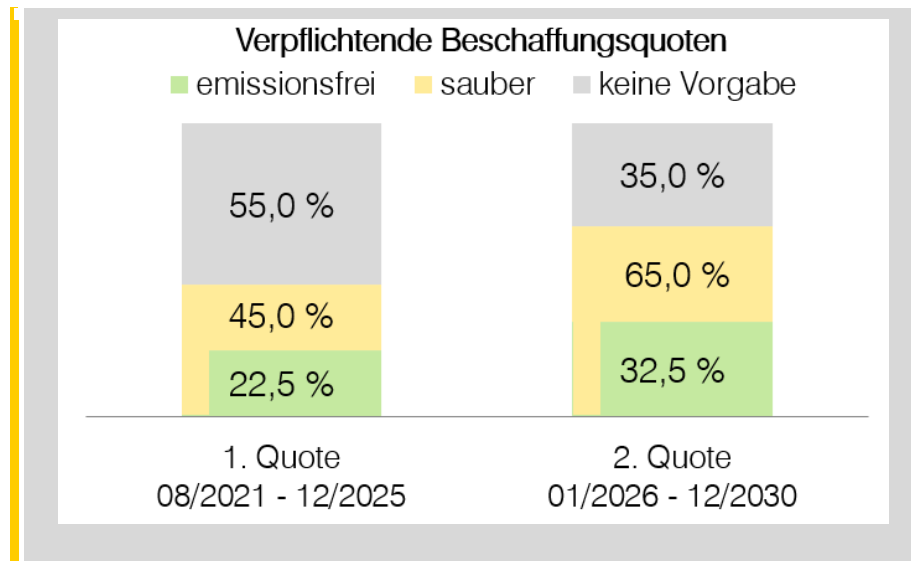


Abbildung 1.1: Beschaffungsquoten der CVD

Es werden zwei **Referenzzeiträume** definiert:

- ▶ **2. August 2021 - 31. Dezember 2025:** Bei Fahrzeugbeschaffungen gilt eine Mindestquote von 45 % für saubere Busse. Mindestens die Hälfte der Quote ist durch emissionsfreie Antriebe zu erfüllen.
- ▶ **Januar 2026 - 31. Dezember 2030:** Die Quote für saubere Fahrzeuge steigt auf 65 %. Erneut soll mindestens die Hälfte der Quote durch emissionsfreie Busse erfüllt werden.

Die Begriffe „saubere“ und „emissionsfreie“ Fahrzeuge sind in der CVD genau definiert.

Saubere Fahrzeuge werden mit alternativen Kraftstoffen im Sinne der europäischen Alternative Fuels Infrastructure Directive (AFID) betrieben. Bezogen auf Busse sind dies Fahrzeuge mit Nutzung der folgenden Energieträger oder Kraftstoffe:

- ▶ Strom
- ▶ Wasserstoff
- ▶ Biokraftstoff
- ▶ Synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe
- ▶ Erdgas inkl. Biomethan, gasförmig (CNG) und flüssig (LNG)
- ▶ Flüssiggas (LPG)

Dies schließt bei der Nutzung von Strom alle rein elektrisch betriebenen Busse sowie auch Plug-In-Hybridbusse und konventionelle Oberleitungsbusse ein. Bei der Nutzung von Biokraftstoffen oder synthetischen und paraffinhaltigen Kraftstoffe dürfen diese nicht mit konventionellen fossilen Kraftstoffen gemischt werden.

Als emissionsfreie Fahrzeuge werden Fahrzeuge ohne Verbrennungsmotor sowie Fahrzeuge mit einem Verbrennungsmotor, der weniger als 1 g CO<sub>2</sub>/kWh bzw. 1 g CO<sub>2</sub>/km

## Hintergrund

ausstößt, bezeichnet. Wiederum bezogen auf Busse meint dies Fahrzeuge mit rein elektrischem Antrieb sowie den Wasserstoff-Verbrenner, d. h. folgende Fahrzeuge:

- ▶ Batteriebusse
- ▶ Batterie-Oberleitungsbusse
- ▶ Brennstoffzellenbusse mit/ohne Range-Extender
- ▶ Wasserstoff-Verbrenner

Demzufolge sind emissionsfreie Fahrzeuge zugleich saubere Fahrzeuge. Andersherum gilt dies jedoch nicht.

Mit dem Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeugBeschG) vom 9. Juni 2021 wurde die CVD in nationales Recht überführt. Dieses regelt, wie die Beschaffung sauberer und emissionsfreier Fahrzeuge in Deutschland zu erfolgen hat. Betroffen von dem Gesetz sind die Beschaffung von Fahrzeugen und Dienstleistungsaufträge durch öffentliche Auftraggeber und Sektorenauftraggeber durch folgende Verträge:

- ▶ Verträge über den Kauf, das Leasing oder die Anmietung von Straßenfahrzeugen
- ▶ Öffentliche Dienstleistungsaufträge gemäß der Verordnung (EG) Nr. 1370/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007, die folgende jährliche Schwellenwerte übersteigen:
  - ▶▶ 1 Million Euro oder 300.000 Kilometer
  - ▶▶ 2 Millionen Euro oder 600.000 Kilometer bei unter 23 Fahrzeugen
- ▶ Dienstleistungsaufträge über Verkehrsdienste, die im EU-Amtsblatt (TED) unter folgenden CPV-Nummern bekannt gemacht werden:
  - ▶▶ 60112000-6 Öffentlicher Verkehr (Straße)
  - ▶▶ 60130000-8 Personensonderbeförderung (Straße)
  - ▶▶ 60140000-1 Bedarfspersonenbeförderung

Die Quoten sind in jedem Bundesland durch alle öffentlichen Auftraggeber und Sektorenauftraggeber insgesamt einzuhalten. Die Länder haben die Einhaltung der Quoten zu überwachen. Sie können für ihren Zuständigkeitsbereich zulassen, dass bestimmte Auftraggeber die Mindestziele nicht einhalten müssen, soweit diese bereits durch andere Auftraggeber innerhalb des Landes übererfüllt werden. Hierzu werden ausdrücklich Branchenvereinbarungen in den Ländern genannt. Außerdem haben die Länder die Möglichkeit, untereinander einen Ausgleich zu erzielen. Gemäß dem Rundschreiben des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) vom 8. Juli 2021 vertreten die Bundesländer dazu jedoch die Auffassung, dass grundsätzlich jeder einzelne Auftraggeber die Quote einhalten muss. Dabei soll Flexibilität insofern bestehen, dass dessen Beschaffungen wie oben beschrieben über den Referenzzeitraum insgesamt einbezogen werden.

Die Quoten müssen über den jeweiligen Referenzzeitraum eingehalten werden, d. h. es ist jeweils der Zeitraum vom 02.08.2021 bis 31.12.2025 bzw. vom 01.01.2026 bis 31.12.2030 als Ganzes relevant.

## Hintergrund

Verpflichtet zur Einhaltung der Quoten sind alle Beschaffungen, deren Auftragsbekanntmachung nach dem 2. August 2021 veröffentlicht wird oder bei denen nach dem 2. August 2021 zur Abgabe eines Angebotes aufgefordert wird. Es können jedoch für die Erfüllung der Ziele auch Zuschlagserteilungen angerechnet werden, die nach dem 2. August 2021 erfolgt sind, deren Bekanntmachung jedoch vor dem Stichtag lag.

Ob ein Auftrag unter die Quote des ersten oder zweiten Referenzzeitraumes fällt, bemisst sich am Datum der Zuschlagserteilung. In der Praxis fällt damit eine Ausschreibung, die beispielsweise am 01.01.2025 veröffentlicht, für die aber erst am 01.01.2026 der Zuschlag erteilt wird, unter die Mindestziele der zweiten Periode.

## 2 Technologische Grundlagen

Im Folgenden wird ein Überblick über das Elektrobussystem in seiner Gesamtheit gegeben. Es werden die alternativen Antriebskonzepte und deren Kernkomponenten sowie die zugehörige Versorgungsinfrastruktur beleuchtet.

### 2.1 Elektrische Antriebskonzepte

Die elektrischen Antriebskonzepte von Bussen unterteilen sich gemäß Abbildung 2.1 in rein elektrische Antriebe und Hybridantriebe. Für alle Busse mit elektrischem Antrieb kann übergeordnet der Begriff „Elektrobus“ verwendet werden.

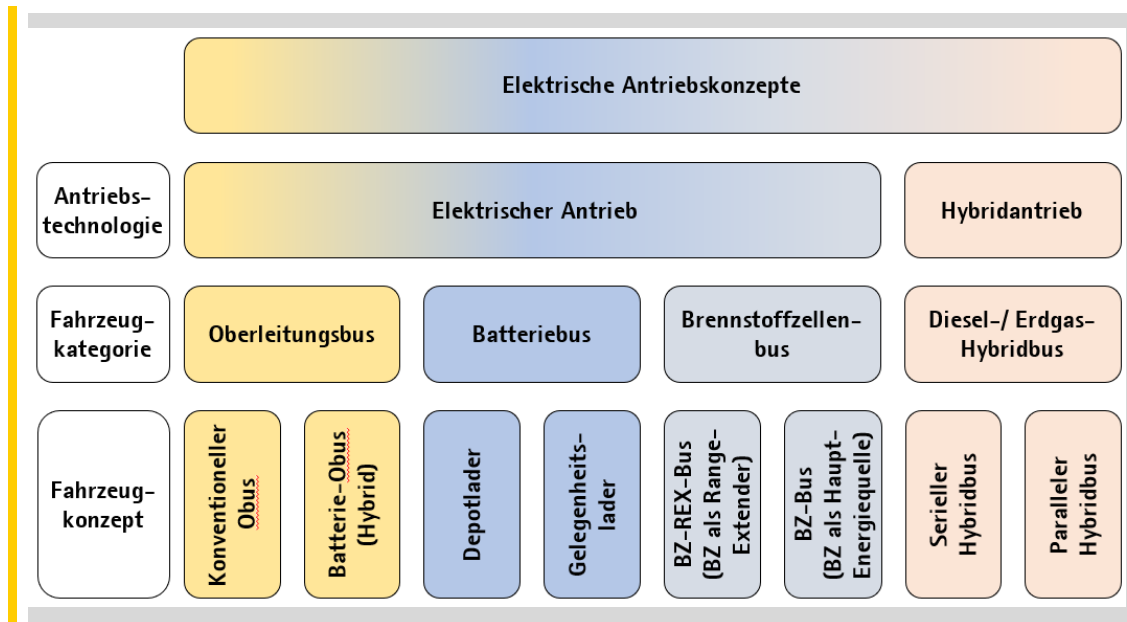


Abbildung 2.1: Konfigurationsmöglichkeiten Elektrobus

Bei allen elektrischen Antriebskonzepten besteht als gemeinsames Merkmal die Möglichkeit zur Rückgewinnung von Bremsenergie (Rekuperation) durch die Nutzung des Elektromotors im generatorischen Betrieb und dessen Gebrauch als Nutzbremse. Die dabei gewonnene Energie dient zum Zwischenladen des auf dem Fahrzeug befindlichen Energiespeichers. Diese Technik ermöglicht die Rückgewinnung von bis zu 75 % der Bremsenergie.

#### 2.1.1 Elektrischer Antrieb

Die nachfolgenden Fahrzeugkategorien werden betrachtet:

- ▶ Oberleitungsbus
- ▶ Batteriebus
- ▶ Brennstoffzellenbus

### 2.1.1.1 Oberleitungsbus

Oberleitungsbusse werden in zwei Gruppen unterteilt, konventionelle Oberleitungsbusse und Batterie-Oberleitungsbusse.

Oberleitungsbusse verfügen nicht zwangsläufig über eine Traktionsbatterie, denn sie beziehen die benötigte Antriebsenergie über eine Oberleitung. Die Energiezuführung erfolgt dynamisch, d. h. während der Fahrt. Durch die baulich festgesetzte Lage der Oberleitungen sind Abweichungen vom regulären Streckenverlauf nur (sehr) beschränkt möglich, z. B. in Form von Spurwechseln, da die Fahrzeuge je nach Ausführung auf die permanente Energiezuführung aus der Oberleitung angewiesen sind. Aufgrund der dynamischen Energiezuführung aus der Oberleitung, spielt der Energiebedarf der Heizanlage oder der Klimatisierung im Hinblick auf die Reichweite des Fahrzeugs nur eine untergeordnete Rolle.

#### **Konventioneller Obus**

Konventionelle Oberleitungsbusse können verhältnismäßig kurze Fahrten ohne Oberleitung bei verminderter Leistung über ein Notaggregat oder einen Energiespeicher zurücklegen. Für den regulären Betrieb sind sie durchgehend auf die Oberleitung angewiesen.

#### **Batterie-Obus (BOB)**

Batterie-Oberleitungsbusse verfügen über eine größere Traktionsbatterie und können je nach der Kapazität mehrere Kilometer bei unveränderter Leistung ohne Oberleitung zurücklegen. Mit dieser Option ist der Aufbau eines Oberleitungsbus-Netzes wesentlich weniger komplex und preisintensiv, da Oberleitungen und deren Verzweigungen bspw. im Kreuzungs- und Kurvenbereich entfallen können.

Die Reichweite von Batterie-Oberleitungsbusen wird maßgeblich von der Kapazität der Traktionsbatterie, der Auslastung, Topographie und dem Fahrprofil auf den oberleitungsfreien Strecken beeinflusst. Beim Einsatz von Batterie-Oberleitungsbusen sollten, im Sinne der Betriebssicherheit, mindestens 40 % bis 50 % der Strecke sowie Endhaltestellen und Steigungsstrecken über eine Oberleitung verfügen. Zu beachten ist, dass das Ein- und Ausdrachten der Fahrzeuge im Stand erfolgt. Das Ein- und Ausdrachten während der Fahrt befindet sich bislang im Status der Prototypenphase.

Oberleitungsbusse gelten als erprobt und robust und zeichnen sich durch lange Nutzungszeiten von bis zu 20 Jahren sowie geringe Betriebskosten aus. Die Kosten für Wartung und Instandhaltung sind geringer als für Dieselbusse. Die Verfügbarkeit entspricht der von Dieselbussen. Unter anderem aufgrund der hohen Aufwendungen für die erforderliche Infrastruktur und im Vergleich zu Dieselbussen höheren Fahrzeugkosten (vgl. Tabelle 1) werden sie europaweit jedoch nur selten eingesetzt.

## Technologische Grundlagen

| Fahrzeug  | Oberleitungsbus     | Batterie-Oberleitungsbus |
|-----------|---------------------|--------------------------|
| Solobus   | 540.000 - 610.000 € | 580.000 - 670.000 €      |
| Gelenkbus | 580.000 - 750.000 € | 720.000 - 880.000 €      |

Tabelle 1: Investitionskosten Oberleitungsbus

### 2.1.1.2 Batteriebus

Batteriebusse (BEB) verfügen über eine Traktionsbatterie (vgl. Abbildung 2.2), welche stationär für den Betriebseinsatz mit elektrischer Energie geladen wird (Plug-In-System und/oder Pantograph) sowie einen oder mehrere Elektromotoren zur Bewältigung der eigentlichen Traktionsaufgabe. Die Einsatzfähigkeit dieser Fahrzeuge richtet sich nach dem Energieinhalt des Batteriespeichers sowie der zulässigen Lade- und Entladeleistung und damit der resultierenden maximalen Ladegeschwindigkeit.

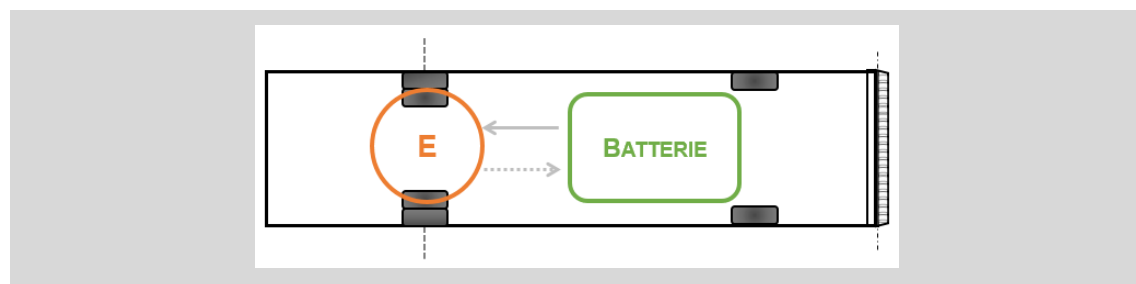


Abbildung 2.2: Prinzip Batteriebus

Generell werden Batteriebusse nach ihrer Ladestrategie in Übernacht- und Gelegenheitslader unterteilt. Die Wahl der jeweiligen Ladestrategie wird im Wesentlichen von folgenden Aspekten bestimmt:

- ▶ Heizkonzept (rein elektrisch oder hybrid),
- ▶ Klimatisierungskonzept (Fahrerklimateuerung,  $\Delta T$ -Klimatisierung, Vollklimatisierung),
- ▶ Umlaufplänen und Gesamtfahrweiten,
- ▶ der Möglichkeit von Fahrpausen für das Wiederaufladen der Batterien,
- ▶ der Möglichkeit für zum Errichten/Betreiben von Ladeinfrastruktur außerhalb des Betriebshofs.

### Depotlader/Volllader

Das Volllader-Prinzip (Depotlader) beruht auf der ausschließlichen Nachladung der Batterien auf Betriebshöfen oder Abstellanlagen, während dafür vorgesehener Aufenthaltszeiten.

Ist die Kapazität des Energiespeichers im Fahrzeug für einen ganzen Tageseinsatz ausgelegt, so handelt es sich um einen Voll- oder auch Übernachtslader (engl. Overnight



## Technologische Grundlagen

Charger). Die Nachladung der im Vergleich zum Gelegenheitslader größeren Energiespeicher erfolgt an zentralen Punkten während der Betriebspause, vorzugsweise im Betriebshof. Bei zeitgleicher Ladung von mehreren Bussen an einem Ort ist eine entsprechende Anzahl von Ladepunkten vorzusehen. Die Auslegung der Ladepunkte ist abhängig von der Kapazität und der maximalen Ladeleistung der Batterie und des für die Ladung zur Verfügung stehenden Zeitfensters. Diese Parameter bestimmen das Betriebskonzept.

Während der mit moderater Leistung zeitlich ausgedehnten stationären Ladung kann der Ladezyklus optimiert werden. Diese Ladestrategie schont die Speicherzellen, was sich positiv auf die Lebensdauer der Batterien auswirkt.

Aufgrund der bislang noch begrenzten Reichweite ist es möglich, auch beim Depotlader eine Zwischenladung während des Einsatztages zu realisieren, um die Tagesfahrleistung zu optimieren oder die Netzlast während der Nachtladung zu reduzieren. Hierfür ist auch der Begriff Depotlader bzw. Zwischenlader üblich – in Abgrenzung zum Übernachtslader, welcher ausschließlich in den Nachtstunden und Zeiten der Betriebsruhe lädt. Eine solche Zwischenladung mit, im Vergleich zur Gelegenheitsladung, geringer Ladeleistung kann beispielsweise bei längeren Betriebspausen im Betriebshof oder an den Wendepunkten erfolgen. Auch ein Fahrzeugtausch ist für ein solches Szenario denkbar.

Die beim Depotlader erforderliche hohe Kapazität des Energiespeichers verursacht ein hohes Gewicht und erhöht folglich das Fahrzeugleergewicht. Entsprechend reduziert sich die zur Verfügung stehende Platzkapazität. Hersteller setzen in der Regel acht Personen je Quadratmeter für die Berechnung der Stehplatzkapazität an, jedoch ist in der Realität die tatsächliche Belegung auch bei einem scheinbar vollen Bus deutlich geringer. Teilweise erfordert die Batterie des Depotladers einen größeren Einbauraum im Fahrzeug. Bei den meisten Herstellern befinden sich die Traktionsbatterien jedoch auf dem Dach des Fahrzeugs bzw. im vormaligen Motorturm. Zunehmend gehen Hersteller bei kompletten Neuentwicklungen von Fahrzeugen auf Elektrobus-Plattformen zur Installation von unterflurigen Batteriepaketen über.

Die Kosten für den Energiespeicher steigen nahezu linear mit der erforderlichen Speicherkapazität. Bei Depotladern kommen überwiegend die sogenannten Hochenergiebatterien zum Einsatz. Sie sind für große Energiemengen und eine moderate Ladeleistung ausgelegt. Kapazitätsbereinigt ist die Hochenergiebatterie kostengünstiger als eine Hochleistungsbatterie. Typische, nach derzeitigem Stand der Technik eingesetzte Zellchemien für Hochenergiebatterien sind LFP- (Lithium-Eisenphosphat) und NMC- (Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid) Batterien. Die NMC-Batterie zeichnet sich durch eine höhere gravimetrische Energiedichte, die LFP-Batterie durch geringere spezifische Kosten in €/kWh sowie eine höhere Zyklenfestigkeit und Kobaltfreiheit aus.

Die Verfügbarkeit von Batteriebusen liegt aktuell bei maximal 90 % bis 92 %. Somit sind mindestens 8 % bis 10 % der Flottengröße als Werkstattreserve vorzusehen. Aufgrund der neuartigen Technologie sind eher 12 % bis 13 % empfehlenswert. Bezüglich der

## Technologische Grundlagen

Wartung und Instandhaltung liegen noch keine ausreichenden Informationen zur Bewertung vor. Der Wartungs- und Instandhaltungsaufwand kann bei Batteriebussen im Vergleich zu Dieselnissen als ähnlich eingeschätzt werden. Zwar ist der Elektroantrieb mechanisch einfacher aufgebaut als eine Verbrennungskraftmaschine und kann im generatorischen Betrieb rekuperierend und verschleißfrei bremsen, dafür ergeben sich neue Wartungs- und Instandhaltungsumfänge. So weisen beispielsweise die komplex aufgebauten Elektroportalachsen geringere Standzeiten als konventionelle Antriebsstränge auf. Auch der Reifenverschleiß ist aufgrund der hohen möglichen Anfahrmomente der Traktionsmotoren und der momentan noch höheren Fahrzeugleergewichte tendenziell höher.

Bei entsprechender Dimensionierung der Fahrzeugbatterie kann ein Depotlader viele der derzeit üblichen Betriebsszenarien von Dieselnissen gleichwertig abbilden. Abhängig vom Fahrprofil und der Fahrzeugkonfiguration können mit einer Ladung Reichweiten von ca. 150 km bis 300 km erreicht werden. Sie bieten im Vergleich zu Gelegenheitsladern – welche stets eine betriebliche Abhängigkeit von ihrer Zwischenlademöglichkeit haben – eine größere Einsatzflexibilität, lediglich begrenzt durch die Reichweite des Busses. Sie müssen im Vergleich zu Gelegenheitsladern auf einem Betriebshof oder einer Abstellanlage deutlich mehr Energie nachladen. Das kann wiederum zu einer leistungsstärkeren und damit teureren Ladeinfrastruktur sowie zu höheren Anschlussleistungen und damit verbundenen Mehrkosten führen. Die Fahrzeugbeschaffungskosten von Depotladern liegen teilweise noch unter denen für Gelegenheitslader (vgl. Tabelle 2).

### Gelegenheitslader

Gelegenheitslader (engl. Opportunity Charger) werden in der Regel bei planmäßig längeren Aufenthaltszeiten auf dem Betriebshof sowie an Ladestationen außerhalb des Betriebshofes geladen.

Die Ladestrategie sieht entsprechend der Streckencharakteristik neben einer Nachladung auf dem Betriebshof weitere Ladepunkte an Wendepunkten vor. Zusätzlich können ausgewählte Haltestellen mit längerer Haltezeit als Ladepunkte mit hoher Nachladeleistung (Gelegenheitsladung) ausgelegt werden.

Der Gelegenheitslader verfügt über einen kleineren Energiespeicher, welcher nicht für einen kompletten Tageseinsatz ausgelegt ist. Der Energiespeicher muss während des Linieneinsatzes auf der Strecke nachgeladen werden. Im Gegensatz zum Depotlader mit Zwischenladung kommen beim Gelegenheitslader hohe Ladeleistungen und oft auch ein eigens hierfür vorgesehene Ladesystem (z. B. Docking-Station) zur Anwendung.

Der Batteriebus fährt einen Ladepunkt, der an einer Haltestelle eingerichtet ist, an. Sobald das Fahrzeug am Ladesystem positioniert ist, wird automatisch oder durch eine Aktion des Fahrpersonals die Kontaktherstellung ausgelöst und anschließend die Energieübertragung mit Leistungen bis derzeit etwa 450 kW gestartet. Generell

## Technologische Grundlagen

beanspruchen hohe Ladeleistungen herkömmliche Akkumulatoren stärker, d. h. sie führen zu einer verstärkten Zellalterung und wirken sich somit negativ auf die Lebensdauer des Energiespeichers aus.

Im Vergleich zum Depotlader-Konzept, welches den Einsatz großer, teils kostenintensiver und schwerer Energiespeicher erfordert, kann durch das Zwischenladen während des Betriebseinsatzes der Energiespeicher kleiner ausgelegt werden. Dies wirkt sich in mehreren Aspekten positiv auf das Gesamtfahrzeug aus: Kleinere Energiespeicher haben ein geringeres Gewicht und nehmen weniger Bauraum in Anspruch. Für 1 kWh Energieinhalt sind ca. 6...8 kg Batteriegewicht einschließlich Batteriemangement anzusetzen. Die daraus resultierenden Fahrzeuginvestitionskostenschätzungen in Tabelle 2 sind Kostenindikationen aus der Programmbegleitforschung „Innovative Antriebe Fahrzeuge und Antriebe“ des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI, ab 2018 laufend).

Da nur vergleichbar geringe Speicherkapazitäten benötigt werden, kommen neben den elektrochemischen Batterien auch andere Speichertechnologien wie Kondensatoren bzw. genauer Ultrakondensatoren (Supercaps) in Betracht. Sie eignen sich für viele Lastzyklen und hohe Spitzenströme ohne große Beanspruchung des Speichers, weisen aber geringere Energiedichten auf. Auf Grund des hohen Platzbedarfs sind Supercaps nur bedingt für den Einsatz in Elektrobussen geeignet und finden sich daher nur in hybriden Antriebssystemen in Verbindung mit Verbrennungsmotoren.

Gelegenheitslader bieten demnach ein höheres Platz- und Gewichtspotenzial für die Personenbeförderung sowie für den Verbau weiterer Aggregate. Der freiwerdende Bauraum wird dabei für – bei der Gelegenheitsladung – benötigte Komponenten wie z. B. dem Pantographen genutzt.

Da zur Wahrung der Betriebssicherheit gewisse Ladezeiten sicherzustellen sind, erfordert die Gelegenheitsladung gegebenenfalls eine Erhöhung der Wendezeiten, was zu Anpassungen in der Umlauf- und Betriebsablaufplanung führt.

Bei Sicherstellung der erforderlichen Ladevorgänge kann ein Gelegenheitslader quasi zeitlich unbegrenzt eingesetzt werden. Auf entsprechend ausgestatteten und betriebenen Fahrwegen können somit Dieselbusse vollständig ersetzt werden.

Die Abhängigkeit der Gelegenheitslader von den vorgesehenen Zwischenladepunkten schränkt generell den flexiblen Einsatz der Gelegenheitslader im Liniennetz stark ein. Im Zuge betrieblicher Planungen bspw. im Falle kurz- (wegen Baustellen) oder langfristiger (Umstellung des Liniennetzes) Umlaufanpassungen sind die Ladepunkte als zusätzliche fixe Randbedingung in die Planung aufzunehmen.

Sobald einzelne Ladepunkte durch eine Vielzahl von Bussen genutzt werden, kann ein Investitionskostenvorteil erzielt werden.

Technologische Grundlagen

| Fahrzeug  | Kosten Voll-lader   | Kosten Gelegenheitslader   |
|-----------|---------------------|----------------------------|
| Midibus   | 400.000 - 480.000 € | unzureichende Datengrundl. |
| Solobus   | 520.000 - 650.000 € | 550.000 - 690.000 €        |
| Gelenkbus | 675.000 - 750.000 € | 650.000 - 850.000 €        |

Tabelle 2: Investitionskosten Batteriebus

2.1.1.3 Brennstoffzellenbus

Bei Brennstoffzellenbussen handelt es sich um einen seriellen Hybridantrieb mit einer wasserstoffbetriebenen Brennstoffzelle an Stelle der Motor-Generatoreinheit. Die Brennstoffzelle wird über einen Gleichspannungswandler an den Zwischenkreis des elektrisch angetriebenen Fahrzeugs angebunden.

Es wird zwischen Brennstoffzelle als Range Extender (BZ-REX-Bus) und Brennstoffzellenbus (BZB) mit der Brennstoffzelle als Hauptenergiewandler unterschieden (vgl. Abbildung 2.3). Den Elektromotor oder die Elektromotoren zum Antrieb des Fahrzeugs in der Abbildung als ‚E‘ dargestellt, nutzen beide Konzepte.

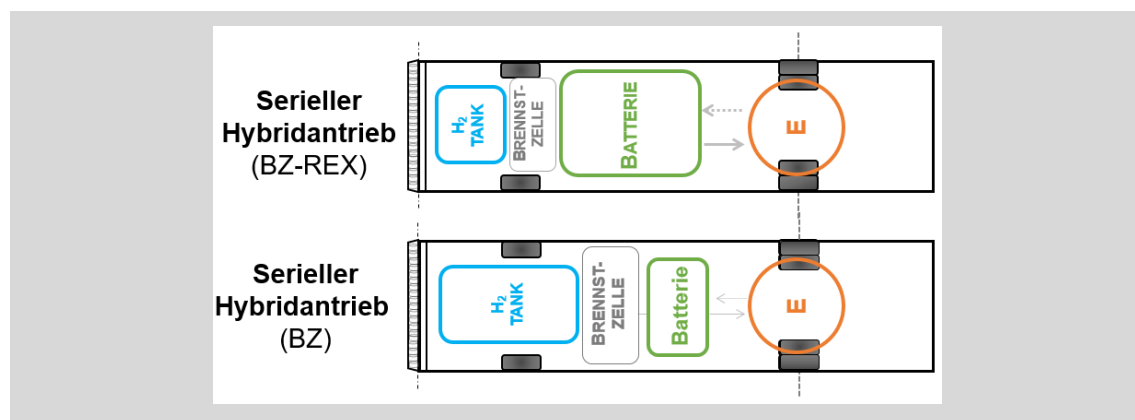


Abbildung 2.3: Kategorisierung von Brennstoffzellenbussen

Beide Fahrzeuge verfügen über eine vergleichbare Antriebskonfiguration. Der wesentliche Unterschied liegt in der Auslegung des Traktionsenergiespeichers und der Brennstoffzelle (BZ). Bei dem BZB wird der wesentliche Teil der Antriebsenergie durch die Brennstoffzelle bereitgestellt, beim BZ-REX-Bus durch die Traktionsbatterie.

**BZB (BZ als Hauptenergiequelle)**

Der BZB kann lediglich mit der entsprechenden Wasserstoffversorgung betrieben werden.

Der BZB verfügt auch über eine Traktionsbatterie, diese dient dazu, Energie aus der Rekuperation sowie überschüssige Energie der Brennstoffzelle zu puffern. Ein regelmäßiges

## Technologische Grundlagen

externes Nachladen der Traktionsbatterie ist nicht erforderlich, da die Versorgung hauptsächlich über die Brennstoffzelle erfolgt. Durch die größeren Reichweiten und kürzeren Betankungszeiten (<10 Min. mit Vorkühlung) können reine Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu rein batterieelektrischen Bussen flexibler eingesetzt werden. Die Betankung der Fahrzeuge erfolgt wie bei einem Erdgasfahrzeug über einen Tankstutzen.

Aktuell auf dem Markt befindliche BZB verfügen über Wasserstofftanks mit einem Fassungsvermögen von 30 bis 51 kg H<sub>2</sub> und können damit 300 bis 400 km zurücklegen. Der Energiebedarf der Gesamtfahrzeuge wird aufgrund der zur Beheizung nutzbaren Abwärme der Brennstoffzelle (60 bis 90 °C) geringer vom Heizkonzept beeinflusst als dies z. B. beim Batteriebus der Fall ist. Der Wasserstoffverbrauch von reinen BZB liegt bei 8,5 bis 10,6 kg/100 km. Je nach Bezugskosten für Wasserstoff und je nach Fahrbedingung ergeben sich daraus Energiekosten von etwa 70 bis 85 €/100 km.

Die Markteinführung von BZB steht aktuell noch am Anfang, weshalb auch eine Abschätzung anfallender Kosten nur schwer möglich ist. Die in Tabelle 3 genannten Werte sind deshalb als Orientierung zu werten. Größter Kostenfaktor sind die Brennstoffzelle und die Batterien, welche während einer typischen Nutzungszeit des Fahrzeugs von 12 Jahren mindestens einmal getauscht werden müssen.

| Komponente                      | BZB                 | BZ-REX-Bus          |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|
| Leistung Brennstoffzelle (12 m) | 60 – 100 kW         | 30 kW               |
| Energieinhalt Batteriespeicher  | 28 – 40 kWh         | > 200 kWh           |
| Investitionskosten Solobus      | 600.000 – 650.000 € | 600.000 – 650.000 € |
| Investitionskosten Gelenkbus    | 800.000 – 850.000 € | 800.000 – 850.000 € |

Tabelle 3: Charakteristika Brennstoffzellenbus

Zu Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie zur Verfügbarkeit von BZB liegen derzeit noch keine ausreichenden Erkenntnisse vor. Aktuell wird nicht davon ausgegangen, dass die Instandhaltungskosten unterhalb denen von Dieselnissen liegen. Bis zum Vorliegen ausreichender Daten sollte daher von einer Kostengleichheit ausgegangen werden. Die betriebliche Verfügbarkeit von BZB wird aktuell auf maximal 90 % angesetzt.

### BZ-REX-Bus (BZ als Range-Extender)

Die Traktionsbatterie des BZ-REX-Busses muss regelmäßig extern (z. B. durch Ladestecker) geladen werden. Damit ist beim BZ-REX-Bus immer auch eine zusätzliche Ladeinfrastruktur erforderlich. Die – im Vergleich zum reinen BZB – deutlich größere Batterie (> 200 kWh) stellt maßgeblich die Traktionsenergie für die abzubildende Reichweite bereit. Die zusätzlich installierte Brennstoffzelle dient der Verlängerung der Reichweite durch eine kontinuierliche Nachladung der Batterie während des Betriebs. Der Vorteil bei diesem Konzept liegt in einer weniger transienten Beanspruchung der Brennstoffzelle.

### Technologische Grundlagen

Diese kann daher kontinuierlicher in Kennfeldpunkten mit mittlerer Last betrieben werden. In diesen Lastpunkten arbeitet die Brennstoffzelle mit ihrem optimalen Wirkungsgrad, was sich positiv auf den Gesamtenergieverbrauch auswirken kann.

Der Speicherinhalt der Brennstoffzellenbusse mit Range-Extender ist mit 25 – 35 kg H<sub>2</sub> geringer als der des reinen Brennstoffzellenbusses. Die Verbräuche eines BZ-REX-Busses können je nach Umlauflänge und Fahrzeugkonfiguration aufgrund des Betriebsregimes zwischen Batteriespeicher und Brennstoffzelle im Vergleich zum reinen Brennstoffzellenfahrzeug stark variieren. In Zukunft könnte der Einsatz einer Wasserstoff-Brennstoffzelle als Range-Extender dazu dienen, besonders lange und somit für rein batterieelektrische Busse ungeeignete Strecken ergänzend zu elektrifizieren.

Das BZ-REX-Bus-Konzept befindet sich in der Vorserie. Aktuell bietet kein auf dem deutschen Markt relevanter Hersteller ein serienreifes, verfügbares Fahrzeug an. Aus diesem Grund stellt die Kostenabschätzung in Tabelle 3 nur eine Indikation dar.

#### 2.1.2 Hybridantrieb

Ein Hybridantrieb ermöglicht den Antrieb eines Busses mit unterschiedlichen Energieträgern. Er verfügt in der Regel:

- ▶ über einen Verbrennungsmotor, mit oder ohne elektrischen Generator sowie
- ▶ über einen oder mehrere Elektromotoren und
- ▶ einen Energiespeicher zum Bereitstellen / Speichern elektrischer Energie.

Je nach Umsetzung des Hybridantriebs erfolgt eine Kategorisierung entsprechend den folgenden Kategorien: Voll- und Mildhybrid.

Der Vollhybridantrieb erlaubt abschnittsweise ein reinelektrisches Fahren, der Verbrennungsmotor lässt sich vollständig auskuppeln. Beim Mildhybridantrieb ist ein Elektromotor/-generator in das Getriebe integriert. Der Elektromotor/-generator wird hauptsächlich vom Verbrennungsmotor angetrieben. Beim Bremsen kann mittels Rekuperation Energie aufgenommen und beim Beschleunigen dem System wieder zugeführt werden. Der Elektromotor wirkt lediglich unterstützend, ein rein elektrisches Fahren ist jedoch nicht möglich.

Besteht die Möglichkeit ein Hybridfahrzeug stationär über eine externe Energiezuführung zu laden, so bezeichnet man dieses als Plug-In-Hybrid. In der Regel sind Plug-In-Hybride immer Vollhybridfahrzeuge und können als paralleler oder serieller Hybrid ausgeführt sein.

Im Folgenden wird entsprechend der Antriebskonzepte (vgl. Abbildung 2.4) zwischen dem seriellen Hybridbus und parallelen Hybridbus unterschieden.

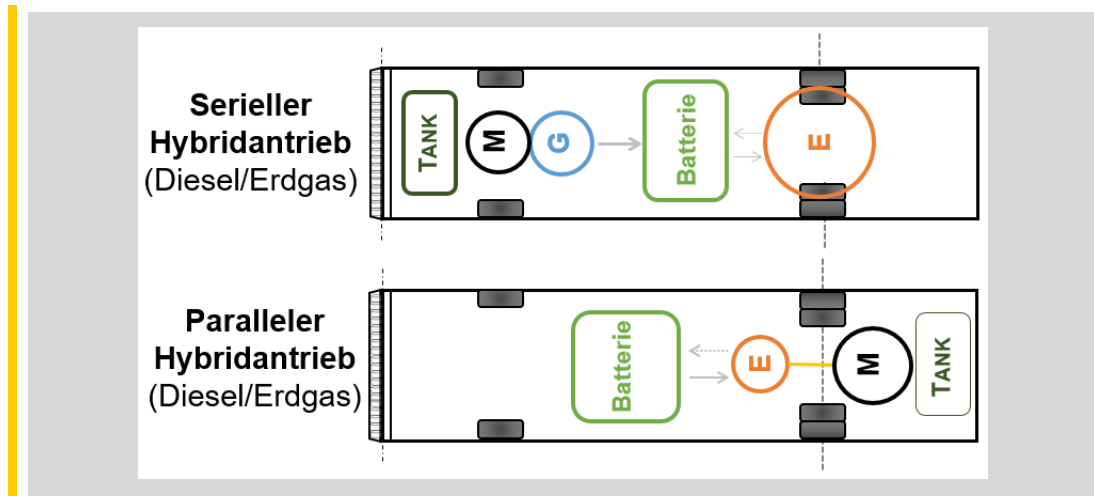


Abbildung 2.4: Hybride Fahrzeugkonzepte Bsp. Diesel-/Erdgas-Bus

### 2.1.2.1 Serieller Hybridbus

Beim seriellen Hybridantrieb wirkt der Elektromotor als primärer Antrieb. Die benötigte elektrische Energie wird in der Regel von einer On-Board-Energieerzeugung, meist einer Motor-Generatoreinheit (Tank/M/G), bereitgestellt. Das System verfügt über einen Traktionsenergiespeicher (Batterie), welcher sowohl Energie der On-Board-Energieerzeugung als auch rekuperierte Energie aufnehmen und an den Elektromotor (E) abgeben kann. Der Verbrennungsmotor verfügt über keine mechanische Verbindung zu den anzutreibenden Rädern. Bei Fahrzeugen mit seriellen Hybridantrieb handelt es sich immer um Vollhybride.

### 2.1.2.2 Paralleler Hybridbus

Beim parallelen Hybridantrieb können sowohl der Elektro- als auch der Verbrennungsmotor das Fahrzeug direkt antreiben. Je nach Anforderung kann der elektrische Antrieb genutzt werden, um Lastspitzen zu glätten (z. B. beim Anfahren) oder Teilstrecken rein elektrisch zu bewältigen. Der Verbrennungsmotor kann dazu ausgekoppelt und gestoppt werden. Fahrzeuge mit parallelem Hybridantrieb können somit als Voll- oder Mildhybridfahrzeuge ausgeführt sein.

### 2.1.3 Antriebssystem

In Bussen mit alternativem Antrieb kommen vornehmlich wechselstrombetriebene Synchron- oder Asynchronmotoren zum Einsatz. Neben einem einfachen technischen Aufbau weisen diese Elektromotoren einen hohen Wirkungsgrad im Vergleich zu Dieselmotoren auf.

In Dieselmotoren wird generell ein einzelner Motor eingesetzt, der die gesamte Traktionsleistung aufbringt. Das Pendant der alternativen Antriebe stellt dazu das Zentralmotorkonzept dar. Darüber hinaus können Elektrobusse auch mit mehr als einem

## Technologische Grundlagen

Elektromotor angetrieben werden. Solche Systeme werden üblicherweise als radnahe oder der Radnabenantriebe ausgeführt. Ihnen gemein ist die Verteilung der Gesamttraktionsleistung auf mehrere Motoren.

### 2.1.3.1 Zentralmotoren

Zentralmotoren sind bei Dieselnbussen Standard. Im Hinblick auf alternative Antriebe bietet ein elektrischer Zentralmotor eine vergleichsweise einfache Möglichkeit zur Umrüstung und der damit nachträglichen Elektrifizierung eines Fahrzeugs. In diesem Fall werden Verbrennungsmotor einschließlich der Abgasnachbehandlung und Tank durch Batterie, Elektromotor und Wechselrichter ersetzt. Viele der vorher bereits vorhandenen Komponenten wie z. B. Antriebswelle und Differentialgetriebe verbleiben (vgl. Abbildung 2.5).

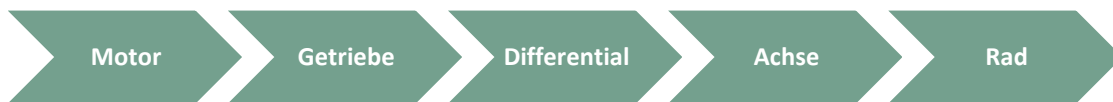


Abbildung 2.5: Antriebsstrang Zentralmotor

Zentralmotoren gelten als robust und vergleichsweise preiswert. Ein Nachteil am Konzept Zentralmotor ist jedoch die hohe Anzahl an mechanischen Schnittstellen, durch welche der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs negativ beeinflusst wird. Der Wirkungsgrad von Antriebssträngen mit Zentralmotor beträgt etwa 75 %. Diese Antriebsarchitektur kommt beispielsweise bei Bussen vom Typ „MAN Lions City E“ zum Einsatz.

### 2.1.3.2 Radnaher Antrieb

Beim Einsatz von radnahen Motoren verfügt der Elektrobus über eine Achse mit zwei Elektromotoren jeweils unmittelbar vor einem Rad. Die Kopplung zum Rad findet über ein Planetengetriebe statt, sodass der Motor nicht direkt im Radkörper angeordnet ist. Aufgrund der radnahen Bauweise können auf ein Differentialgetriebe sowie die beim Zentralmotor vorhandene Antriebswelle verzichtet werden (vgl. Abbildung 2.6).

Radnahe Motoren ermöglichen durch ihren Einbauort eine größere Flexibilität bei der Gestaltung des Innenraums. Mit sinkender Anzahl von Komponenten im Antriebsstrang, reduzieren sich außerdem auch die Energieverluste, im Vergleich zur Variante mit Zentralmotor. Der Wirkungsgrad von Antriebssträngen mit radnahen Motoren beträgt etwa 80 %. Diese Variante findet bei der häufig verwendeten Antriebsachse vom Typ „AVE 130“ des Herstellers ZF Anwendung.



## Technologische Grundlagen



Abbildung 2.6: Antriebsstrang radnaher Motor

### 2.1.3.3 Radnabenantrieb

Unter Radnabenmotoren sind Elektromotoren zu verstehen, die sich in den Felgen der Fahrzeuge befinden und die Radnabe tragen. Bei diesem Aufbau entfallen alle übrigen Komponenten des Antriebsstrangs, die Umdrehungen des Motors werden direkt auf das Rad übertragen (vgl. Abbildung 2.7). Aus diesem Grund stellen sie die effizienteste Antriebsmöglichkeit dar. Aufgrund ihrer räumlichen Anordnung im Radkörper ermöglichen zwar auch sie eine größere Flexibilität bei der Innenraumgestaltung, wegen der hohen ungefederten Masse kann sich ihre Anwendung jedoch negativ auf die Fahrdynamik auswirken.



Abbildung 2.7: Antriebsstrang Radnabenmotor

Der Wirkungsgrad von Antriebssträngen mit Radnabenmotor beträgt rund 90 %. Ein Vertreter dieser Antriebsart ist beispielsweise das Antriebsmodul „ZAwheel“ der Firma Ziehl-ABEGG.

### 2.1.4 Energiespeicher

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor beziehen ihre Energie aus einem flüssigen oder gasförmigen Kraftstoff (i. d. R. Diesel oder Erdgas), der im Tank mitgeführt wird. Der Tank speichert also chemische Energie. Für Elektrofahrzeuge hingegen existieren verschiedene Möglichkeiten, die benötigte Antriebsenergie zu speichern. Unterschieden wird zwischen chemischen, elektrochemischen und elektrischen Speichern. Es existieren auch mechanische Energiespeicher (z. B. Schwungradspeicher), die aber wegen ihrer fehlenden Anwendung in Bussen nicht betrachtet werden.

Energiespeicher werden hinsichtlich folgender Kriterien unterschieden und bewertet:

- ▶ gravimetrische Energiedichte (kWh/kg) / Leistungsdichte (W/kg)
- ▶ Volumetrische Energiedichte (kWh/l) / Leistungsdichte (W/l)

## Technologische Grundlagen

- ▶ Lade- und Entladegeschwindigkeiten (elektr.- u. elektrochemische Energiespeicher)
- ▶ Zyklenfestigkeit (elektr.- u. elektrochemische Energiespeicher)
- ▶ Selbstentladung (elektr.- u. elektrochemische Energiespeicher)
- ▶ Kosten.

Wesentlicher Vorteil konventioneller Dieselfahrzeuge ist die hohe spezifische Energiedichte des mitgeführten Treibstoffes (11,8 kWh/kg). Die Energiedichte gibt an, wie viel Energie je Masseneinheit oder je Volumeneinheit gespeichert werden kann. Die Tabelle 4 gibt einen Überblick zu den gravimetrischen Energiedichten von Diesel, Wasserstoff, Li-Ion-Batterien.

|                                       | Diesel | H <sub>2</sub> | Li-Ion |
|---------------------------------------|--------|----------------|--------|
| Gravimetrische Energiedichte (kWh/kg) | 11,8   | 33,33          | 0,089  |

Tabelle 4: Vergleich gravimetrischer Energiedichten

### 2.1.4.1 Batteriespeicher

Bei Batteriespeichern handelt es sich um elektrochemische Speicher. Diese wandeln zugeführte elektrische Energie in elektrochemische Energie und speichern diese ab. Bei Bedarf wird die elektrochemische Energie wieder in elektrische Energie umgewandelt und an den Verbraucher abgegeben. Traktionsbatteriespeicher bestehen aus einer Vielzahl in Reihe und parallel verschalteter Einzelzellen und basieren vorwiegend auf Li-Ion-Technologie. Diese werden in verschiedene Zellchemien – je nach Zusammensetzung der Anode und Kathode – untergliedert. In Elektrobussen kommen hauptsächlich Li-Ionen-Batterien auf NMC- (Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid), LFP- (Lithium-Eisenphosphat) sowie LTO- (Lithium-Titanat-Oxid) Basis zum Einsatz. Jede dieser Zellchemien hat spezifische Vor- und Nachteile hinsichtlich der Leistungsdichte, Zyklenfestigkeit und Kosten und eignet sich somit für unterschiedliche Einsatzprofile. Daneben existieren z. B. Batterien mit NaNiCl- (Natrium-Nickelchlorid) oder NiMH-Zellen (Nickel-Metallhydrid).

Traktionsbatterien werden gegenwärtig auf eine hohe speicherbare Energiemenge oder eine hohe Leistungsaufnahme und -abgabe ausgelegt. Dementsprechend existieren Hochenergie- und Hochleistungsbatterien. Hochenergiebatterien ermöglichen es, eine verhältnismäßig große Energiemenge zu speichern. Hochleistungsbatterien ermöglichen schnellere Auf- und Entladevorgänge als dies bei den Hochenergiebatterien der Fall ist. Sie sind tendenziell etwas teurer im Einkauf.

Der real nutzbare Energieinhalt der Traktionsbatterie ist geringer als die nominelle Auslegungsgröße und wird normalerweise vom Batteriemanagementsystem (BMS) der Batterie und/oder dem Fahrzeughersteller begrenzt. Gängige Werte sind:

- ▶  $SOC_{max}$  = 90 % der Nennkapazität (zulässiger Höchstladestand)
- ▶  $SOC_{min}$  = 10 % der Nennkapazität (zulässige Entladetiefe)

## Technologische Grundlagen

Die Batteriespeicher unterliegen komplexen Alterungsfaktoren, die sich auf deren Lebensdauer und gleichzeitig auf die Nutzungsdauer in der Traktionsanwendung auswirken. Die Alterungsfaktoren untergliedern sich in:

- ▶ kalendarische Alterung: abhängig von der Temperatur und dem SOC
- ▶ zyklische Alterung: abhängig vom SOC-Hub, der Strom-Rate (auch: C-Rate<sup>1</sup>) sowie der Temperatur.

Nach allgemeiner Definition gilt eine Batterie als gealtert und damit nicht mehr für die Traktionsanwendung geeignet, wenn ihre Kapazität auf 80 % der initialen Nennkapazität gesunken ist oder sich der Innenwiderstand auf 200 %, ebenfalls bezogen auf den initialen Wert, erhöht hat. Die Batteriespeicher müssen nach aktuellem Stand der Technik mindestens einmal während der Nutzungszeit eines Fahrzeugs getauscht werden.

#### 2.1.4.2 Brennstoffzelle (Wasserstoff)

In Brennstoffzellen werden Wasserstoff (aus Tank) und Sauerstoff (aus der Umgebungsluft) bei Temperaturen von 60 bis 90 °C zu Wasser umgewandelt und so elektrische Energie freigesetzt (Abbildung 2.8). Bei dem Prozess werden keine Schadstoffe, Lärm oder Vibrationen emittiert. Derzeit verfügbare Brennstoffzellen weisen einen Wirkungsgrad von 40 bis 60 % auf. Die Investitionskosten, im üblichen Leistungsbereich der Zellen von 60 bis 100 kW (reine BZB), belaufen sich auf 100.000 bis 140.000 €. Die Nutzungsdauer von Brennstoffzellen liegt bei über 30.000 Betriebsstunden/6 - 8 Jahre, weshalb während der Nutzungsdauer eines Fahrzeugs, üblicherweise 10 bis 12 Jahre, mindestens ein Tausch der Stacks erforderlich wird.

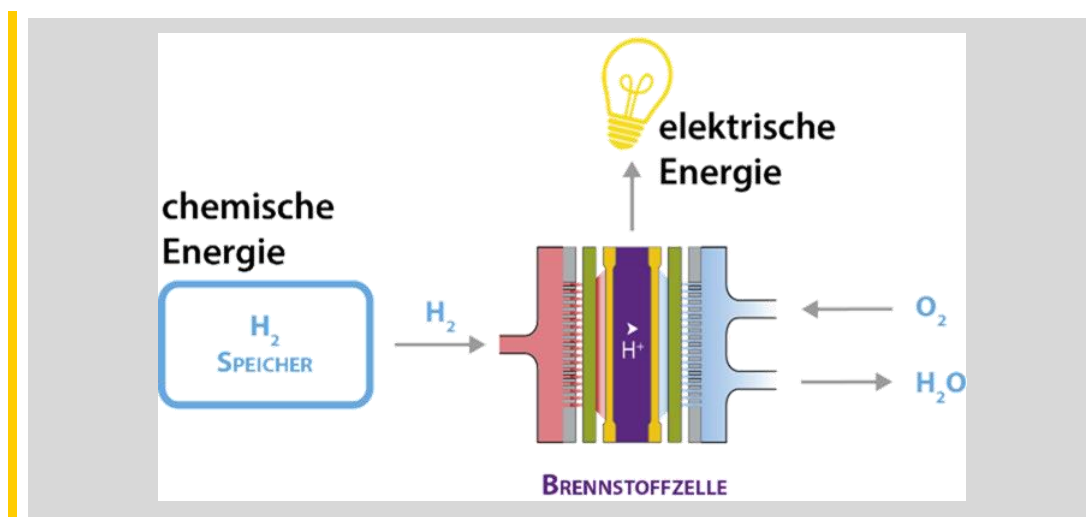


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Wasserstoffbrennstoffzelle

<sup>1</sup> Hinweis | Verhältnis von Batterieladestrom zu nominellem Ladungsinhalt, 1 C = Ladestrom, mit dem die Batterie in 1 Stunde vollständig geladen werden kann

## Technologische Grundlagen

Bei den verwendeten Brennstoffzellen handelt es sich um Protonenaustauschmembran-Brennstoffzellen (PEMFC). Diese gelten als sehr schmutzempfindlich, weshalb sehr reiner Wasserstoff benötigt wird. Da Wasserstoff unter Normalbedingungen eine hohe gravimetrische, aber niedrige volumetrische Energiedichte von  $0,089 \text{ kg/m}^3$  (Diesel  $820\text{-}845 \text{ kg/m}^3$  nach DIN EN 590) besitzt, erfolgt die Speicherung auf Bussen in Druckbehältern bei einem Niveau von 350 bar.

Der Einsatz von Brennstoffzellen ist wegen der stark eingeschränkten Infrastruktur (Stand 06/2021) und der hohen erforderlichen Energie zur Erzeugung von Wasserstoff bisher auf wenige Projekte begrenzt. Aufgrund der Nationalen Wasserstoffstrategie (seit 06/2020) und der technologieoffenen Förderrichtlinie für Busse mit klimafreundlichen, alternativen Antrieben des BMDV (07.09.2021) wird der Ausbau der Infrastruktur finanziell unterstützt.

### 2.1.5 Heizungs- und Klimatisierungskonzept

#### 2.1.5.1 Energiebedarf

Speziell bei den alternativen Antrieben bildet der Energiebedarf der Nebenverbraucher einen wesentlichen Bestandteil des Gesamtenergiebedarfs ab. Denn der elektrische Antrieb verfügt zwar über einen höheren Wirkungsgrad, aufgrund der reduzierten oder gänzlich fehlenden Abwärme des Verbrennungsmotors werden jedoch zusätzliche Heizelemente zur Temperierung des Innenraums erforderlich. Generell gilt, je niedriger die Außentemperaturen, desto größer wird der Bedarf an Heizenergie im Fahrzeug (vgl. Abbildung 2.9).

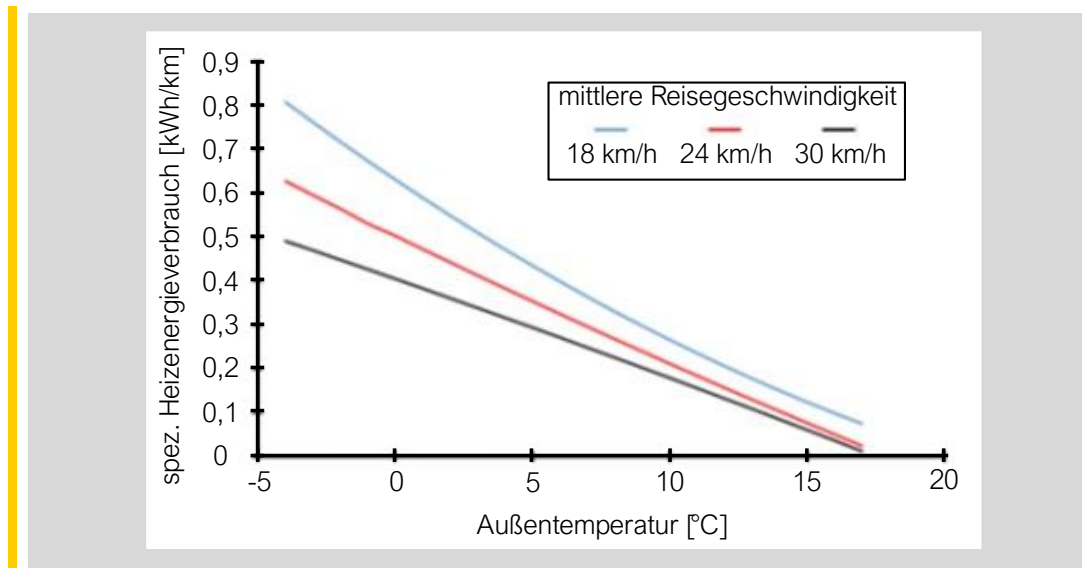


Abbildung 2.9: Spezifischer Heizenergiebedarf eines Standardbusses

Ein 12-m-Dieselbus verfügt über einen 150 l Tank. Der Tankinhalt von 150 l Diesel entspricht einer Energie von ca. 1.479 kWh und ermöglicht eine Reichweite von 395 km.

## Technologische Grundlagen

Rund 33 % dieses Energiegehalts wird vom Motor in mechanische, also Antriebsenergie umgewandelt, weitere 33 % gehen dem System als Abgaswärme verloren, die verbleibenden 33 % werden als Wärme an den Kühlkreislauf abgegeben (vgl. Abbildung 2.10). Von der an den Kühlkreislauf abgegebenen Wärmeenergie (~493 kWh) können rund 400 kWh zum Heizen des Fahrgastinnenraums genutzt werden. Um eine ausreichende Temperierung sicherzustellen, verfügen Dieselbusse für gewöhnlich über eine zusätzliche Heizanlage mit einer Heizenergie von 740 kWh, sodass eine Gesamtheizenergie von 1.140 kWh bereitgestellt werden kann.

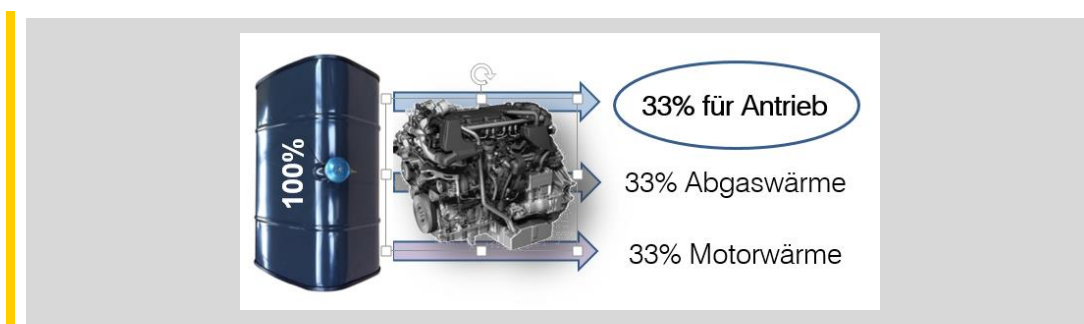


Abbildung 2.10: Energiebilanz Dieselbus

Batteriebusse verfügen im Vergleich zum Dieselbus über einen sehr effizienten Antrieb (Elektromotor  $\eta = 0,98$ ). Dies bedeutet jedoch auch, dass kaum Abwärme des Antriebs zum Heizen des Innenraums genutzt werden kann. Die äquivalent zum Dieselbus erforderliche Energie von 1.140 kWh muss vollständig von der Heizanlage aufgebracht werden. Bei Brennstoffzellenfahrzeugen vermindert sich diese Problematik wiederum, da hier durch die Brennstoffzelle 40 % der eingebrachten Energie in Abwärme umgewandelt und zum Heizen verwendet werden kann (vgl. Abbildung 2.11).

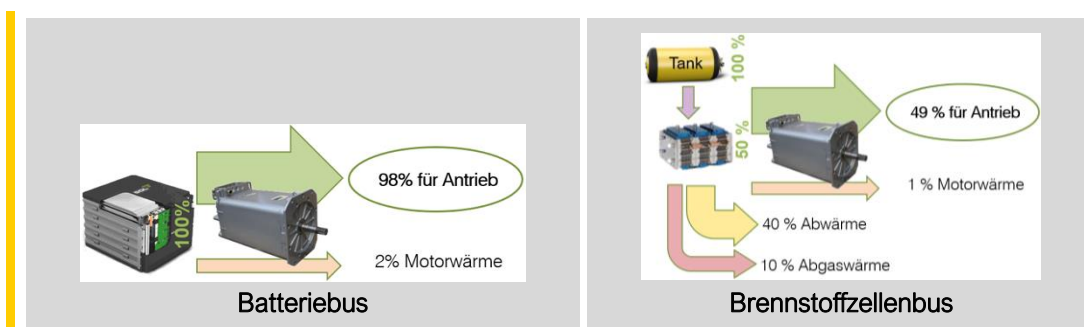


Abbildung 2.11: Energiebilanz von Batterie- und Brennstoffzellenbus

Eine Gegenüberstellung der Energiebedarfe (vgl. Tabelle 5) verdeutlicht, dass der Bedarf der Heizanlage bei Batteriebussen den des Antriebs übersteigt. Dies wird besonders dann zur Herausforderung, wenn z. B. zur Begrenzung von Schadstoffemissionen die Energie nicht durch eine Dieselheizung erzeugt werden darf und ebenfalls vom Traktionspeicher bereitgestellt werden muss. Damit sei der wesentliche Einfluss des

## Technologische Grundlagen

Heizkonzeptes auf den Gesamtenergiebedarf von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb erklärt.

| Laufleistung 395 km,<br>Heizung 21 h | Dieselbus | Batteriebus | Brennstoffzellenbus |
|--------------------------------------|-----------|-------------|---------------------|
| Gesamtenergiebedarf                  | 2.219 kWh | 1.640 kWh   | 1.917 kWh           |
| Gesamtenergie Fahren                 | 1.479 kWh | 500 kWh     | 1.317 kWh           |
| Zusatzenergie Heizung                | 740 kWh   | 1.140 kWh   | 600 kWh             |

Tabelle 5: Fahrzeugenergiebedarf unterschiedlicher Antriebskonzepte

### 2.1.5.2 Heizungssystem

Die Tagesmitteltemperaturen im deutschen Raum können, mit lokalen Abweichungen, zwischen  $-20$  und  $+30$  °C variieren. Dementsprechend ist es erforderlich, die Temperatur im Innenraum von Bussen zu steuern, also den Innenraum zu heizen oder zu klimatisieren. Dafür kommen je nach vorherrschendem Klima, den Vorgaben zur Innenraumtemperatur und dem Fahrzeug-/ Antriebskonzept verschiedene technische Systeme zur Anwendung. Bei Dieselnissen wird die Heizenergie in der Regel einerseits in Form der Motorabwärme über das Kühlsystem sowie von einer zusätzlichen Brennstoffheizung (i. d. R. Diesel) bereitgestellt. Das allgemein erklärte Ziel, Schadstoffemissionen lokal durch den Einsatz alternativer Antriebe zu reduzieren, macht jedoch andere Lösungen erforderlich. Hier sind es besonders die Batteriebusse, bei denen das Heizkonzept einen wesentlichen Faktor zur Bemessung des gesamten Energiespeicherkonzepts/der Traktionsbatterien darstellt. Zur Erzeugung von Heizenergie in Bussen kommen im Wesentlichen fünf Systeme zum Einsatz:

- ▶ Hybridheizung
- ▶ Infrartheizung
- ▶ Wärmepumpe
- ▶ Elektrischer Widerstand
- ▶ Brennstoffheizung

In der Brennstoffheizung werden üblicherweise Diesel, Heizöl oder Erdgas als Energieträger in Heizenergie umgewandelt. Außer zur Steuerung ist hier keine elektrische Energie erforderlich. Mit Verwendung einer Brennstoffheizung ist ein lokal emissionsfreies Fahren jedoch nicht mehr möglich. Jedoch können die lokalen Schadstoffemissionen durch den Einsatz synthetischer GtL-Kraftstoffe auf Erdgasbasis (GtL– engl. Gas to Liquid) vermindert werden.

#### **Hybridheizung**

Die Hybridheizung ist ein teilelektrisches Brennstoffheizsystem. Bei mäßigen Temperaturen von über  $5$  °C ist eine verhältnismäßig geringe Heizleistung erforderlich; in diesem

---

## Technologische Grundlagen

Fall setzt die elektrische Heizung ein. Leistungsspitzen, die bei Außentemperaturen von unter 5 °C erforderlich sind, werden über eine zusätzliche Brennstoffheizung abgedeckt.

### ***Infrartheizung***

Als weiteres mögliches Heizsystem kommen in Fahrzeugen vereinzelt elektrische Infrartheizungen zum Einsatz. Diese erzeugen bei den Insassen das gleiche Behaglichkeitsgefühl bei niedriger Innenraumtemperatur. Der Betrieb ist direkt durch die Hochvoltanlage möglich, wodurch eine hohe Effizienz erreicht wird.

In Elektrobussen ist der Einsatz einer vollelektrischen Heizung immer dann vorteilhaft, wenn die Einsparung von Emissionen ein wesentlicher Grund zur Umstellung auf alternative Antriebe darstellt. Können die Umläufe allerdings nicht mit einer vollelektrischen Heizung realisiert werden, ist zunächst der Einsatz einer Hybridheizung in Erwägung zu ziehen.

### ***Wärmepumpe***

Bei der Wärmepumpe befindet sich ein Kältemittel in einem geschlossenen Kreislauf. Dieses wird über eine Pumpe verdichtet und so erwärmt. Diese Wärme wird dann genutzt, um den Innenraum zu Heizen. Wärmepumpen stellen eine effiziente Möglichkeit zum Klimatisieren (Heizen und Kühlen) dar. Die Leistungsfähigkeit von Wärmepumpen wird in Leistungszahlen angegeben:

- ▶ COP, Coefficient of Performance für das Heizen oder
- ▶ EER, Energy Efficiency Ratio für das Kühlen.

Die Leistungszahlen geben das Verhältnis von erzeugter Wärme-/Kälteenergie zu der dafür aufgewendeten elektrischen Energie wieder. Abhängig sind diese Zahlen von der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur sowie dem verwendeten Kältemittel und der Bauart der Wärmepumpe. Moderne Wärmepumpen verfügen über einen COP von 2,0 (bei –10 °C) bis hin zu über 3,0 in Temperaturbereichen oberhalb von 0 °C. Sie erzeugen also mehr Wärmeenergie als dafür an elektrischer Energie aufgewandt werden muss und stellen die effizienteste Heizanlage dar.

Als Kältemittel kommen in Wärmepumpen zwei unterschiedliche Stoffe zum Einsatz: R134a (Tetrafluorethan) oder R744 (CO<sub>2</sub>). R134a bietet bis > 5 °C eine gute Energieeffizienz; R744 von +20 °C bis –20 °C. R134a gilt als höchst klimaschädlich und darf deshalb seit Anfang 2017 nicht mehr in Klimaanlage neuer Kfz verwendet werden. Die Anwendung im Busbereich ist noch zulässig; in Verbindung mit dem Verbot im Kfz-Bereich war jedoch auch ein Preisanstieg sowie eine Verschlechterung der Verfügbarkeit zu verzeichnen.

Technologische Grundlagen

**Widerstandsheizung**

Bei der elektrischen Widerstandsheizung wird elektrische Energie direkt in Wärme umgewandelt. Hierbei handelt es sich um eine vergleichsweise einfache Art Heizenergie zu erzeugen. Ein wesentlicher Nachteil besteht jedoch darin, dass sich der Energiebedarf besonders an kalten Tagen verdoppeln kann. Dies hat speziell bei Batteriebussen einen erheblichen Verlust an Reichweite zur Folge.

**2.1.5.3 Klimatisierung**

Die Kühlung der Fahrzeuge erfolgt üblicherweise durch eine Klimaanlage, deren Kompressor beim konventionellen Diesel direkt an den Motor gekoppelt ist und beim Elektrobus elektrisch betrieben wird. Darüber hinaus kann die Kühlung zum Teil auch über eine Wärmepumpe mit Kühlfunktion erfolgen. Die Energiebedarfe der verschiedenen Kühlsysteme unterscheiden sich nur unwesentlich. Da Diesel- wie elektrisch angetriebene Fahrzeuge gleichermaßen Energie zum Kühlen aufwenden müssen und aufgrund der mitteleuropäischen Klimabedingungen die Beheizung der Fahrzeuge maßgebend energieintensiver ist, stellt dies kein Elektrobusspezifikum dar und wird daher an dieser Stelle nicht vertieft.

**2.2 Versorgungsinfrastruktur**

Die Ausführungen zur Versorgungsinfrastruktur folgen der Struktur in Abbildung 2.12.

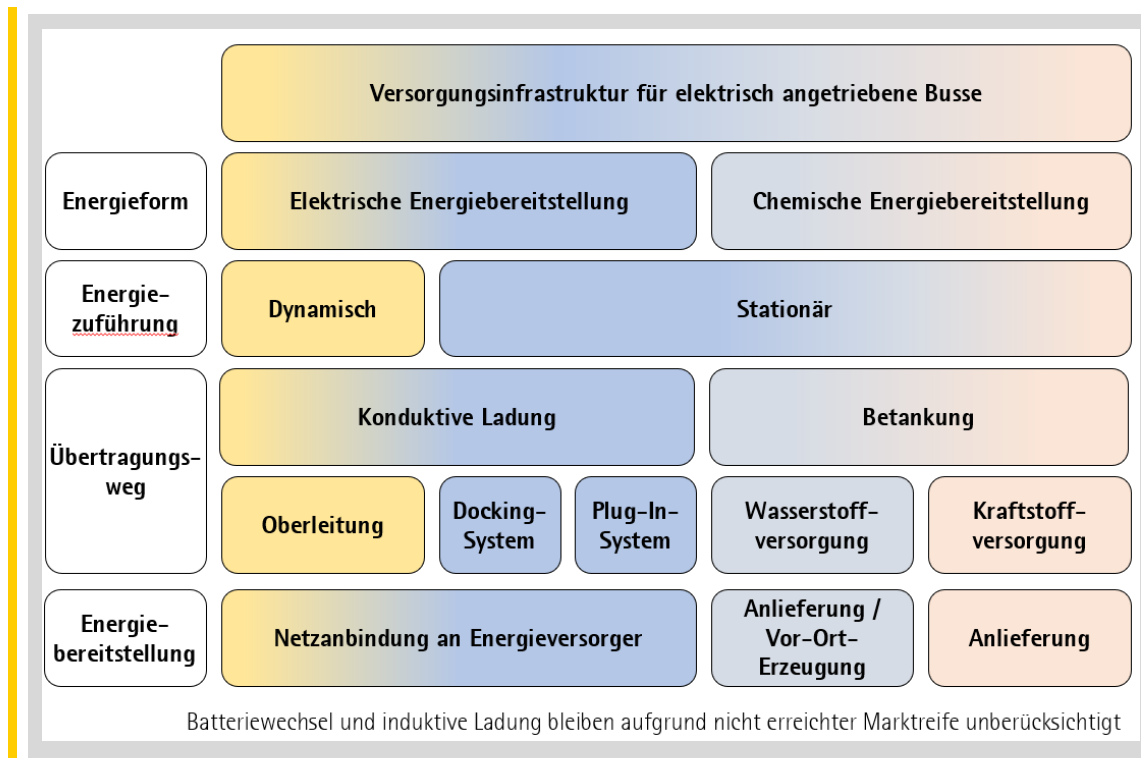


Abbildung 2.12: Versorgungsinfrastruktur für elektrisch angetriebene Busse



### 2.2.1 Elektrische Energiebereitstellung

Die elektrische Energie wird grundsätzlich über ein Netzwerk, das sogenannte Stromnetz, übertragen und verteilt. Die Energiebereitstellung setzt einen Anschluss an die lokale Versorgung voraus. Zur Ladung von Elektrobussen muss eine ausreichende Anschlussdimensionierung sichergestellt sein. Selbst bei kleineren Flotten (< 50 Fahrzeuge) kann der Leistungsbedarf die Leistungsreserve oder -fähigkeit des vorhandenen Transformators, der für die Versorgung des Betriebshofes zuständig ist, übersteigen. Deshalb kann es für die Ladung von Batteriebusen notwendig sein, neben den Ladegeräten ein Verteilungsnetz aufzubauen, um eine zuverlässige und leistungsfähige Ladung zu ermöglichen.

Die Energiezuführung elektrischer Busse muss primär am Betriebshof sichergestellt sein. Eine vollständige Ladung der Fahrzeuge auf der Strecke ist durch den Bedarf an Platz, Zeit und Personal in den meisten Fällen ökonomisch unzureichend darstellbar. Ausschlaggebend ist letztendlich das ausgearbeitete und angewendete Ladekonzept. Dieses umfasst sowohl die Anzahl und Anordnung der Ladegeräte unter Berücksichtigung der Betriebssicherheit, des Personenschutzes sowie der operativen Prozesse, als auch die maximal notwendige Anschlussleistung im Betriebshof oder auf der Strecke.

Die Anschlussleistung im Betriebshof ist vor allem bei einem sogenannten Voll-lader-Konzept (Fahrzeugnachladung ausschließlich im Betriebshof) signifikant. Eine lokale Nähe zur Stromerzeugung (bspw. Kraftwerk) ist hinsichtlich der Erschließung ökonomisch vorteilhaft. Die elektrische Energie wird über ein Verteilnetz bezogen, das wiederum vom Verteilnetzbetreiber (VNB) unterhalten wird. Dieser gibt die technischen Bedingungen zum Anschluss an das Versorgungsnetz vor. Handelt es sich um ein Mittelspannungsnetz, sind die „Technischen Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb“ (kurz: TAR Mittelspannung, VDE-AR-N 4110) zu beachten.

Je nach Leistungsbedarf ist ein Anschluss an das Mittelspannungsnetz (10/20/30 kV) oder an das Hochspannungsnetz (110 kV) vorzunehmen. Zur Trennung zwischen Verteil- und Kundennetz (Busbetriebshof) ist eine Übergabestation einzurichten. Dort sind zu Mess- und Abrechnungszwecken Geräte zu installieren. Im Bedarfsfall kann die Verbindung zum Versorgungsnetz getrennt werden.

Über das betriebshofinterne Verteilnetz wird die Energie auf die Ladegeräte verteilt. Das Verteilnetz kann nach verschiedenen Konzepten als Stich- oder Ringnetz aufgebaut werden. Innerhalb des Verteilnetzes sind Transformatoren einzubinden, welche die Mittelspannung in Niederspannung wandeln. Aus dieser Niederspannung, allgemein 3AC-400 V werden die Ladegeräte gespeist. Die Ladegeräte wirken als Gleichrichter, die ausgangsseitig Strom und Spannung stellen können. Die Ladegeräte versorgen die elektrifizierten Busse via Kabel oder Pantographen.

## Technologische Grundlagen

### Energiezuführung

Elektrische Energie wird grundsätzlich über Ladegeräte in das jeweilige Zielsystem, in dem Falle ein elektrifizierter Bus, übertragen. Das Ladegerät selbst kann fahrzeugseitig oder infrastrukturseitig verbaut sein. Generell lassen sich die stationären Ladeverfahren in konduktive und induktive unterteilen. Die konduktive Zuführung stellt das leitungsgebundene Laden über eine form- oder kraftschlüssige (Steck)-Verbindung dar. Der Begriff der induktiven elektrischen Energiezuführung bezeichnet das kontaktlose Laden unter Nutzung elektromagnetischer Felder. Eine direkte Kontaktierung entfällt. Beide Ladeverfahren können auch dynamisch, also während der Fahrt, realisiert werden. Dabei entspricht das konduktive Energieübertragungssystem der Funktionsweise von Oberleitungsbussen.

Ladevorgänge werden über sogenannte Ladesysteme realisiert. Diese lassen sich in die folgenden Varianten unterteilen:

- ▶ Plug-In-System (Ladegerät fahrzeugseitig oder stationär/extern)
- ▶ Docking-System
- ▶ Ladepunkt Oberleitung (statisch)
- ▶ Oberleitung (dynamisch)
- ▶ Induktionsschleife/Pick-Up (induktiv).

Elektrochemische Energiespeicher sind Gleichspannungssysteme (synonym zum engl. Direct Current; kurz DC). Werden sie über Wechselstrom-Quellen (engl. Alternating Current; kurz AC) gespeist, muss zuvor eine Wandlung erfolgen.

Folgende betriebliche Faktoren beeinflussen den Nachladevorgang:

- ▶ Abstand zwischen einzelnen Ladestationen
- ▶ Verweildauer an der Ladestation
- ▶ Umgebungstemperatur
- ▶ Verfügbarkeit der Ladestation
- ▶ Leistungsfähigkeit der Ladestation.

Folgende Faktoren beeinflussen die Stromaufnahmefähigkeit des elektrochemischen Speichers beim Nachladevorgang:

- ▶ elektrische Dimensionierung (Zellverschaltung, Energieinhalt etc.)
- ▶ Ladezustand (engl. State of Charge, SoC)
- ▶ Alterungszustand (engl. State of Health, SoH)
- ▶ Temperierung.

Vorab kann der Energiebedarf überschlagsmäßig abgeschätzt werden, um auf dieser Basis die notwendigen Speichergrößen in den Bussen sowie die Ladeinfrastruktur zu dimensionieren. Dabei spielen weitere Kriterien zur Bewertung und Bestimmung des Ladesystems eine relevante Rolle:

## Technologische Grundlagen

- ▶ technische Umsetzbarkeit
- ▶ zeitliche Umsetzbarkeit
- ▶ Energieeffizienz
- ▶ Kosten
- ▶ Gesetzliche Rahmenbedingungen.

Um eine Systemscheidung treffen zu können, sind die genannten Faktoren im Kontext mit den betrieblichen Anforderungen des jeweiligen Einsatzszenarios zu bewerten. Die Entscheidung über die Nachladestrategie hat wesentliche Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Systems in Verbindung mit der Attraktivität der Verkehrsdurchführung und der Einsatzstabilität.

### 2.2.1.1 Dynamische Energiezuführung

#### Konduktive Ladung über Oberleitung

Unter der dynamischen, konduktiven Energiezuführung ist leitungsgebundenes Laden während der Fahrt zu verstehen. Das konduktive dynamische Energieübertragungssystem ist bei konventionellen Oberleitungsbussen (O-Bus) bewährt und wird analog auch für Batterie-Oberleitungsbusse mit Batteriespeicher angewandt. Die Energie wird über die (ggf. abschnittsweise) installierte Fahrleitung als Energiequelle durch die fahrzeugseitigen Stangenstromabnehmer übertragen. Für die Stromabnahme werden zwei Fahrdrähte (Plus- und Minuspolung) benötigt (vgl. Abbildung 2.13).

Während der Fahrt unter der Oberleitung gelten diese Fahrzeuge nicht als Batterie-, sondern als Oberleitungsbusse und werden deshalb rechtlich teilweise gesondert behandelt.



Stromabnehmer angedrahtet



Dachaufbauten

Abbildung 2.13: Stromabnehmer bei Oberleitungsbussen

Die Oberleitungsanlage muss sowohl der elektrischen als auch der mechanischen Beanspruchung standhalten. Das Kriterium für die elektrische Beanspruchung ist der elektrische Strom. Moderne Fahrzeuge mit einer hohen Traktionsleistung und hohem Beschleunigungsvermögen erfordern entsprechend eine hohe elektrische

## Technologische Grundlagen

Leistungsabgabe. Hohe Leistungsübertragungen von der Oberleitung auf das Fahrzeug haben eine starke Erhitzung des Fahrdrabtes zur Folge, die bis zur Zerstörung des Systems führen kann. Aufgrund einer drohenden Überhitzung des Fahrdrabtes ist ein Nachladen bei niedrigen Geschwindigkeiten nur mit geringer Leistung möglich. Die Leistungsaufnahme ist somit abhängig vom Geschwindigkeitsprofil des Fahrzeugs. Beispielsweise wird im Geschwindigkeitsband von 0 bis 30 km/h die externe Energiezuführung hauptsächlich für den Beschleunigungsvorgang des Fahrzeugs benötigt. Aufgrund der maximal zulässigen Leistungsübertragung zwischen Oberleitung und Fahrzeug kann während des Anfahrvorgangs also nur eine geringe Leistung für das Nachladen des Energiespeichers genutzt werden.

Die durch die Oberleitung bereitgestellte Energie wird vorrangig für das Fahren genutzt. Die während des Fahrvorgangs abgeforderten Leistungsspitzen können durch Hochleistungskondensatoren (SuperCaps) ausgeglichen werden, die neben dem Batteriespeicher als zusätzliche Energiequelle dienen (Kombispeicher) – jedoch erneut unter Erhöhung des Fahrzeugleergewichts. Der Batteriespeicher wird kontinuierlich während der Fahrt unter der Oberleitung nachgeladen. Der notwendige Ladestrom wird über das Energiemanagementsystem im Fahrzeug festgelegt.

Die begrenzten Stromstärken, die für das Nachladen des Energiespeichers zur Verfügung stehen, beeinflussen die Ladezeit und somit die erforderliche Dauer des Fahrens unter der Fahrleitung. Als pauschale Annäherung kann ein Verhältnis von mindestens 3:1 bis etwa 2:1 für das Fahren unter Oberleitung zum leitungsunabhängigen Fahren angesetzt werden, wobei die genaue Relation immer von den örtlichen Bedingungen abhängt.

Aufgrund der konduktiven, dynamischen Energiezuführung treten mechanische Beanspruchungen auf, die konstruktiv beherrscht werden müssen. Für die mechanische Belastbarkeit der Oberleitung gelten folgende Anforderungen:

- ▶ Die Abspannung der Fahrleitung erfolgt in Abständen von 20 bis 25 Metern.
- ▶ Der Anpressdruck der Stangenstromabnehmer muss durch die Fahrleitung aufgenommen werden.
- ▶ Die zusätzlichen Schwingungen, die vom Fahrbahnprofil über das Fahrzeug auf die Oberleitung übertragen werden, müssen abgefangen werden.

Eine Nutzung der Oberleitungsanlage der Straßenbahn ist nur dann möglich, wenn diese auch für O-Busse ausgelegt ist. Dabei ist neben den oben genannten Anforderungen folgendes zu beachten:

- ▶ Die Aufnahme des Fahrdrabtes ist so zu ändern, dass die Schleifschuhe der O-Bus-Stangenstromabnehmer den Fahrdrabt ohne Beschädigung umschließen können. Dies ist bei üblichen Straßenbahn-Fahrleitungsanlagen nicht gegeben, da Straßenbahnpanatographen den Kontakt mit einem Schleifstück ohne Umfassen der Fahrleitung herstellen. Aktuell laufen Forschungs- und

## Technologische Grundlagen

Entwicklungsaktivitäten eines geraden Schleifstücks, die sich jedoch noch in einem frühen Technologiereifestadium befinden.

- ▶ Es ist ein zweiter Fahrdrat für die Rückleitung erforderlich. Bei Straßenbahnen erfolgt die Rückleitung über die Schiene. Sofern die Strecke auch weiterhin durch die Straßenbahn befahren werden soll, stellt die Doppelnutzung aufgrund der bestehenden Kurzschlussgefahr eine besondere Herausforderung dar.

Die Abbildung 2.14 zeigt den konstruktiven Aufbau einer Oberleitungsinfrastruktur für Oberleitungsbusse sowie (beispielhaft) den Einfluss auf das Stadtbild.



Abbildung 2.14: Oberleitungsbus Salzburg

Der Einsatz von Batteriebusen mit dynamischer, konduktiver Nachladung macht den Auf-, Um- oder Neubau einer Fahrleitungsanlage notwendig. Um eine circa 5 km lange Oberleitungsanlage zu errichten und den Anschluss an ein bestehendes Unterwerk herzustellen, sind Investitionen in Höhe von rund 4 Millionen Euro zu erwarten. Die Errichtung der Oberleitungsinfrastruktur stellt einen nicht unerheblichen Eingriff in das Stadtbild dar und ist mit hohem bautechnischem und planerischem Aufwand verbunden.

Die Umspannstationen arbeiten nahezu wartungsfrei. Der Austausch des Fahrdrathes wird nach ca. 10 bis 15 Jahren notwendig<sup>2</sup>.

Die abschnittsweise Nutzung einer Oberleitungsanlage sollte vorwiegend auf Stammstrecken des ÖPNV mit hoher Nutzungsfrequenz, kurzen Taktfolgen und großen Fahrzeugeinheiten erfolgen. Der hohe Investitionsbedarf in die Oberleitungsanlage und deren langjährige Abschreibung erfordern langfristige Festlegungen zum Einsatz der Fahrzeuge.

<sup>2</sup> Quelle | [https://www.planos-info.de/media/2010\\_09-endbericht\\_osnabueck\\_dlr.pdf](https://www.planos-info.de/media/2010_09-endbericht_osnabueck_dlr.pdf) S. 25  
VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH

## Technologische Grundlagen

### 2.2.1.2 Stationäre Energiezuführung

#### Konduktive Ladung über Docking-System

Stationäre, konduktive Energiezuführungssysteme laden die Energiespeicher im Fahrzeugstillstand. Es können hohe Leistungen zwischen wegseitiger Ladeeinrichtung und fahrzeugseitigem Energiespeichersystem übertragen werden. Über das sogenannte Docking-Station-System wird der Energiespeicher an punktuell im Linienverlauf installierten Ladestationen nachgeladen. Der Vorgang kann auf der Strecke während planmäßiger Fahrzeugstopps an Wendepunkten und/oder Zwischenhaltestellen erfolgen. Diese Form der Energieübertragung wird auch als Gelegenheitsladung (engl. Opportunity Charging) bezeichnet.

Das Spannungs- und Leistungsniveau ist normativ nicht vorgegeben und richtet sich nach dem jeweiligen Anwendungsfall. Im Allgemeinen liegen die Spannungsparameter im Bereich von 400 bis 850 V<sub>DC</sub>, wobei auf Seiten der Ladetechnik teilweise Ausgangsspannungen von 150 bis 920 V<sub>DC</sub> und Ladeleistungen von 150 bis 600 kW<sub>DC</sub> unterstützt werden. Die Ladung erfolgt nach Mode 4 IEC 61851-1. Sowohl die Kommunikation als auch die Ladegeräte selbst sind demnach vergleichbar mit der Steckerladung über Combo 2 (IEC 62196 basiert auf IEC 61851-1).

Je nach Kopplungsrichtung wird zwischen zwei Ausführungsvarianten unterschieden:

- ▶ Hub-Docking-Station: Stromabnehmer zur Kontaktherstellung auf dem Fahrzeugdach (engl. On-board bottom-up pantograph), realisierbarer Hub 1,50 m bis über 1,80 m (vgl. Abbildung 2.15)
- ▶ Senk-Docking-Station: Stromabnehmer zur Kontaktherstellung an der Ladestation (engl. Off-board top-down pantograph), realisierbarer Hub bis 2,50 m (vgl. Abbildung 2.16).



Hub-Docking-Station  
im Projekt SEB Dresden

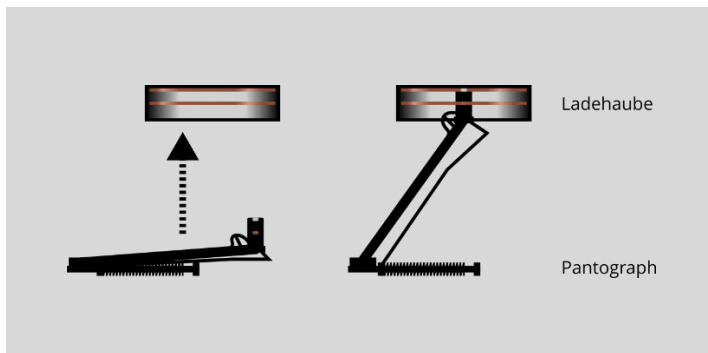


Abbildung 2.15: Hub-Docking-Station

## Technologische Grundlagen

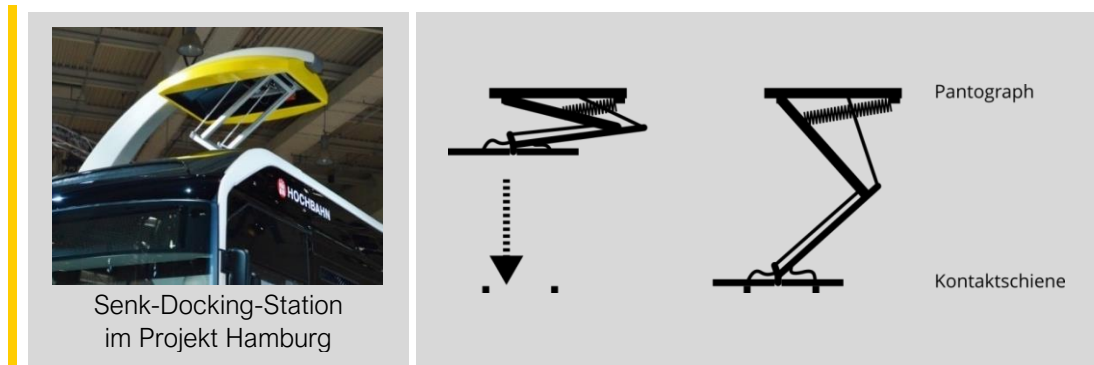


Abbildung 2.16: Senk-Docking-Station

Docking-Systeme verwenden mindestens vier Kontakte und haben üblicherweise folgende Sicherheitsfunktionen implementiert:

- ▶ Schutzleiter (PE),
- ▶ DC+ positive Polung,
- ▶ DC- negative Polung sowie
- ▶ Pilotkontakt (CP).

Mit gesicherter Einhaltung der Kontaktreihenfolge sind Gefährdungen ausgeschlossen. Der Pilotkontakt (CP) detektiert die ordnungsgemäße Kontaktierung und fordert die Nachladung an. Der Schutzleiter (PE) erdet im Fehlerfall die Anlage. Eine automatische Abschaltung der Energieversorgung wird eingeleitet.

### Konduktive Ladung über Plug-In-System

Neben dem für Elektrobusse relevanten Mode 4, sind für den Pkw-Bereich die Modi 1-3 definiert. Auf die Modi 1-3 wird im Weiteren nicht näher eingegangen.

Der sogenannte Mode 4 definiert das Gleichstromladen. Dabei stellen stationär installierte Gleichrichter in einer Ladestation die Schnittstelle bereit. Ein fahrzeugseitiges Ladegerät ist nicht notwendig. Die Dimensionierung der Ladespannung hängt von der zulässigen Spannungsgrenze des zu ladenden Energiespeichers sowie den an die Ladestation übermittelten Zustandsdaten (z. B. SOC) ab. Sie liegt im Bereich von etwa 400 – 800 V<sub>DC</sub>. Die erforderliche Ladeschlussspannung liegt oberhalb der Nennspannung der eingesetzten Batterien.

Es wird zwischen drei Ladevarianten unterschieden, wobei nur die DC-high-Ladung in der IEC 62196 standardisiert wurde:

- ▶ Die DC-low-Ladung erfolgt fahrzeugseitig über zwei Wechselstromkontakte einer Typ-2-Kabelverbindung. Die maximale Ladeleistung beträgt 38 kW<sub>DC</sub>.
- ▶ Die DC-mid-Ladung erfolgt fahrzeugseitig über alle vier Wechselstromkontakte einer Typ-2-Kabelverbindung. Die maximale Ladeleistung beträgt etwa 120 kW<sub>DC</sub>.

## Technologische Grundlagen

- Die DC-high-Ladung nutzt in Europa die Ladeschnittstelle Combo Typ 2 (auch kurz Combo 2), welche eine Erweiterung der üblichen Typ-2-Verbindung um zwei zusätzliche DC-Kontakte darstellt. Die maximale Ladespannung beträgt für den Combo-2-Stecker derzeit 850 V<sub>DC</sub>, der maximale Ladestrom beträgt 250 A. Daraus leitet sich die Maximalladeleistung mit 170 kW<sub>DC</sub> ab (IEC 62196-3).

Die nachfolgende Abbildung 2.17 stellt die Combo-2-Kupplung und -Stecker dar.

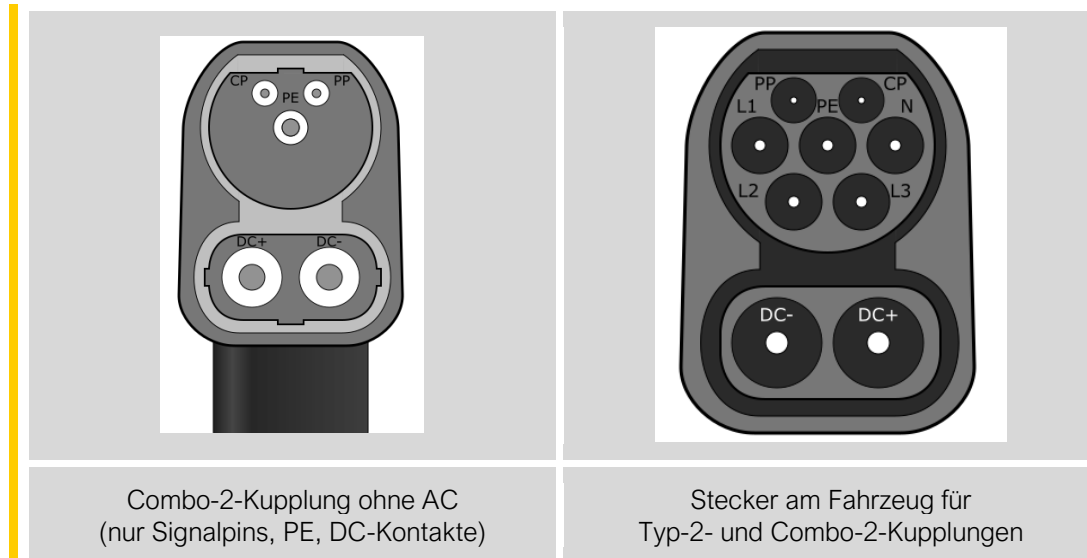


Abbildung 2.17: Belegung Combo-2-Kupplung und -Stecker nach IEC 62196<sup>3</sup>

## Beispielhafte Umsetzung der stationären Energiezuführung



Abbildung 2.18: Stationäre Energiezuführung [Daimler]

<sup>3</sup> Quelle | bearbeitet nach <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CCSCCombo2.svg> Benutzer Ajzh2074



In der Abbildung 2.18 sind verschiedene Varianten der stationären Energiezuführung dargestellt. Dabei sind die Ladegeräte und Einheiten zur Kommunikation platzsparend oberhalb der Busstellplätze angeordnet. Die Busse laden entweder über Stromabnehmer auf dem Dach oder via Steckersystem.

### 2.2.2 Chemische Energiebereitstellung

Zur Bereitstellung und Verteilung chemischer Energie für den ÖPNV-Busverkehr werden im Allgemeinen Tankstellen genutzt. An ihnen werden große Mengen chemischer Energie in Tanks gespeichert oder sie sind direkt an einen Erzeuger über eine Pipeline angeschlossen. Je nach Energieträger unterscheidet sich die bereits ausgebaute Infrastruktur und erfordert mehr oder weniger Aufwand zur Bereitstellung oder Erschließung. Die Bereitstellung mit chemischer Energie ist, abhängig vom verwendeten Medium, unterschiedlich gut ausgebaut.

Momentan besitzen/betreiben die meisten Verkehrsbetriebe eigene Tankstellen, um ihre Fahrzeuge mit Dieselmotorkraftstoff zu betanken. Ihre Versorgung wird mit Tankwägen sichergestellt. Bei einem Tankvorgang wird Kraftstoff mittels einer Pumpe in das zu betankende Fahrzeug gefüllt.

Wasserstofftankstellen werden entweder durch eine Anlieferung des Wasserstoffs per Trailer oder durch eine Onsite-Elektrolyse gespeist. Je nach Hochlaufplanung der Busse kann es sinnvoll sein, in einer ersten Phase den Wasserstoff anliefern zu lassen und später auf eine Vor-Ort-Produktion umzustellen. Zusammenfassend wird Wasserstoff wie folgt bereitgestellt:

- ▶ Anlieferung in flüssiger Form oder als Gas,
- ▶ Onsite- (Vor-Ort-) Erzeugung durch Elektrolyse oder
- ▶ Kombination aus beiden Bereitstellungsformen.

Die herkömmliche Zuführung der chemischen Energieträger erfolgt über einen bewährten Betankungsprozess, d. h. Diesel, Erdgas oder Wasserstoff werden dem Fahrzeug über ein Zapfsystem zugeführt. Diesel wird dabei mithilfe einer Pumpe aus dem Tankstellentank in den Fahrzeugtank gepumpt. Die Betankung von Erdgas- oder Brennstoffzellenfahrzeugen hingegen erfolgt über das Druckausgleichsprinzip. Das verdichtete Gas strömt tankstellenseitig verdichtet in den Tank mit einem niedrigeren Gasdruck, bis ein Ausgleich der Drücke stattgefunden hat. Dazu erfolgt zu Beginn der Betankung ein Druckstoß zur Dichtheitsprüfung, bevor der eigentliche Betankungsprozess beginnt. Basierend auf dem Betankungsprotokoll erfolgt dann mit zunehmend steigendem Druck von Seiten der Tankstelle die eigentliche Betankung, sodass ein relativ gleichmäßiger Volumenstrom gewährleistet werden kann: Kurze Betankungszeiten bei Brennstoffzellenbussen erfordern eine zusätzliche Kühlung des Wasserstoffs, da Wasserstoff, anders als andere Gase wie Luft, sich bei Entspannung erwärmt (Joule-Thomson-Effekt). Der auf dem Fahrzeugdach befindliche Drucktank ist häufig ein sogenannter Typ IV-Drucktank, d. h. es handelt sich um einen Kohlefaser-Tank mit

## Technologische Grundlagen

innenliegendem Kunststoff. Da aufgrund seiner Bauweise beim Betankungsvorgang eine Temperatur von 85 °C nicht überschritten werden darf, ist für eine schnelle Betankung die Vorkühlung des zu betankenden Wasserstoffs erforderlich.

Im Vergleich zur Dieseltankstelle ist die Wasserstofftankstelle mit höheren Betriebskosten verbunden. Diese resultieren aus den Wartungskosten, dem Energieverbrauch des Verdichters und der Kühlung sowie den zusätzlich erforderlichen Sicherheitsprüfungen.

Stationäre Wasserstoffsysteme werden je nach Nutzungsart und Betriebsanforderungen üblicherweise mit 350 bar oder 700 bar betrieben. Busse mit Wasserstofftanks, die anforderungsbedingt mehr als 10 kg Wasserstoff speichern können, werden mit 350 bar Systemdruck ausgelegt.

Die Betankung von Fahrzeugen mit einem Druckgas erfolgt über das Druckausgleichsprinzip. Standards und Normen werden im PKW-Bereich durch die SAE International für die Tankkupplung und das Protokoll des Wasserstoffbetankungsprozesses definiert. Dieser Standard findet international Anwendung.

Für Busse mit ihren im Vergleich zum PKW-Sektor größeren Betankungsmengen einerseits und dem niedrigeren Druckniveau von 350 bar gegenüber 700 bar andererseits wurde ein gesondertes, international abgestimmtes Betankungsprotokoll von Wenger Engineering in Zusammenarbeit mit der Clean Energy Partnership entwickelt.

Führende Hersteller von Wasserstofftankkupplungen bieten für die 350-bar-Technologie zwei verschiedene Kupplungsarten bezüglich des maximalen Volumenstroms an:

- ▶ Normale Tankkupplung mit bis zu 60 g/s
- ▶ High-Flow Kupplung mit Flussraten von bis zu 120 g/s (abwärtskompatibel).

Um das Gefahrenpotenzial während der Nutzung zu minimieren und eine systemunabhängige Betankung zu gewährleisten, ist eine sichere, einheitliche Tankkupplung notwendig. Hier ist neben der standardisierten Kupplungsgeometrie auch ein zuverlässiger Schutz vor versehentlichen Nutzungsfehlern und Beschädigungen, wie beispielsweise das Abreißen des Gasschlauchs erforderlich. Um den mechanischen Betankungsprozess zusätzlich elektrisch abzusichern, kann bei Betankungssystemen eine Infrarotkommunikation an der Tankkupplung vorgesehen werden. Diese ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Tankstelle ermöglicht ein effizienteres Betanken sowie mit Blick auf den Füllgrad eine optimale Befüllung des Fahrzeugtanks.



Abbildung 2.19: Tankkupplung für Wasserstoff mit IR-Kommunikation [weh.de/produkte]

Neben der beschriebenen Betankungstechnologie sind auch eine entsprechende Infrastruktur sowie Tankstellen notwendig, die den Anforderungen eines Busbetriebs mit Wasserstoff gerecht werden. Hier sind in der Vorplanung insbesondere die Themen Logistik, erhöhter Platzbedarf der Betriebsstätten (Druckgasspeicher, Kompressoren etc.), Lärmemission (Kompressoren, Kälteaggregate etc.), Verfügbarkeit/Redundanz sowie Genehmigungsverfahren (BetrSichV, BImSchG) individuell zu betrachten.

#### 2.2.2.1 Wasserstoffversorgung über Anlieferung

Wasserstoff kann sowohl flüssig als auch gasförmig per LKW angeliefert werden. Weiterhin ist die Versorgung mit gasförmigem Wasserstoff durch Pipelines möglich. Üblich ist derzeit die Anlieferung von gasförmigem Wasserstoff in Druckbehältern. Die Anlieferung von flüssigem Wasserstoff ist nur in Einzelfällen ökonomisch.

Um Wasserstoff in größeren Mengen transportieren zu können, ist für gasförmigen Wasserstoff ein Druckniveau von 200 bis 350 bar üblich, möglich sind bis zu 500 bar. Pro Trailerlieferung per LKW können ca. 400 bis 1.100 kg Wasserstoff transportiert werden. Alternativ kann Wasserstoff auch verflüssigt angeliefert werden. Damit können über 3.000 kg pro LKW angeliefert und der logistische Aufwand reduziert werden. Aufgrund des hohen Energieverbrauchs zur Verflüssigung ist das jedoch auch mit höheren Bezugskosten verbunden.

An der Tankstelle muss der Wasserstoff auf einem Druckniveau von 350 bar zum Tanken bereitgestellt werden. Dazu werden im Falle von flüssigem Wasserstoff zunächst ein Verdampfer und anschließend ein Verdichter zum Komprimieren des gasförmigen Wasserstoffs benötigt. Die Dimensionierung der Verdichter erfolgt unter Beachtung der benötigten Wasserstoffmenge und Größe nachliegender Wasserstoffspeicher. Bei gasförmiger Anlieferung kann eine Nachverdichtung auf das benötigte Druckniveau, z. B. mittels einer Booster-Kompression oder mittels eines Verdichters in lokale Speicher, erfolgen. Sowohl von lokalen Speichern als auch von mobilen Speichern kann alternativ auch eine Kaskadenbetankung erfolgen bei der der Wasserstoff aufgrund des Druckniveauunterschiedes überströmt.

### Technologische Grundlagen

Der Verdichter sorgt dafür, dass genügend Wasserstoff auf dem benötigten Druckniveau in ausreichender Menge zur Betankung der Flotte zur Verfügung steht. Aufgrund des hohen Druckniveaus ist der Leistungsbedarf der Verdichter erheblich. Er benötigt je nach Größe und Menge bis zu mehreren Hundert Kilowatt, die bei der elektrischen Auslegung des Betriebshofes oder der nachträglichen Integration einer Wasserstoffbetankungsanlage beachtet werden müssen. Verdichter besitzen im Vergleich zum Nennstrom einen hohen Einschaltstrom. Die hierfür notwendige Einschalt elektronik stellt ebenfalls einen relevanten Kostenfaktor dar.

Wasserstoff wird in Druckspeichern aufbewahrt, die für notwendige Wartungsintervalle möglichst einfach zugänglich aufzustellen sind. Eine unterirdische Anordnung, wie es bei konventionellen Tankspeichern üblich ist, bietet sich dadurch nicht an.



Abbildung 2.20: Typische Elemente einer Wasserstofftankstelle [Volker Watschounek]

Die Abbildung 2.20 stellt beispielhaft die typischen Elemente einer Wasserstofftankstelle dar. Von links beginnend der Trailer, der Niederdruck-Speicher, der Dispenser vor dem Mitteldruck-Speicher sowie der Verdichter in Containerbauweise. Vor den Elementen sind Poller als Anfahrschutz platziert.

#### 2.2.2.2 Wasserstoffversorgung über Vor-Ort-Erzeugung

Wasserstoff kann lokal über Reformierungsverfahren oder die Wasser-Elektrolyse erzeugt werden. Das Reformierungsverfahren aus Erdgas wird vorrangig in der Chemieindustrie eingesetzt und hat den Nachteil, CO<sub>2</sub> zu erzeugen. Folgend findet die Herstellung von Wasserstoff (oder anderen innovativen chemischen Energieträgern) aus fossilen Rohstoffen oder aus nicht regenerativer Energie in der weiteren Ausführung keine Berücksichtigung.

Im Folgenden wird die Prozesskette für die Erzeugung und Verwertung von gasförmigem Wasserstoff beschrieben. Der Schwerpunkt liegt in der Darstellung umweltschonenderer Alternativen zu fossilen Energieträgern.

## Technologische Grundlagen

Wasserstoffproduktionsmittel der Elektrolyse von Wasser ist im folgenden Schema (vgl. Abbildung 2.21) bildlich dargestellt.

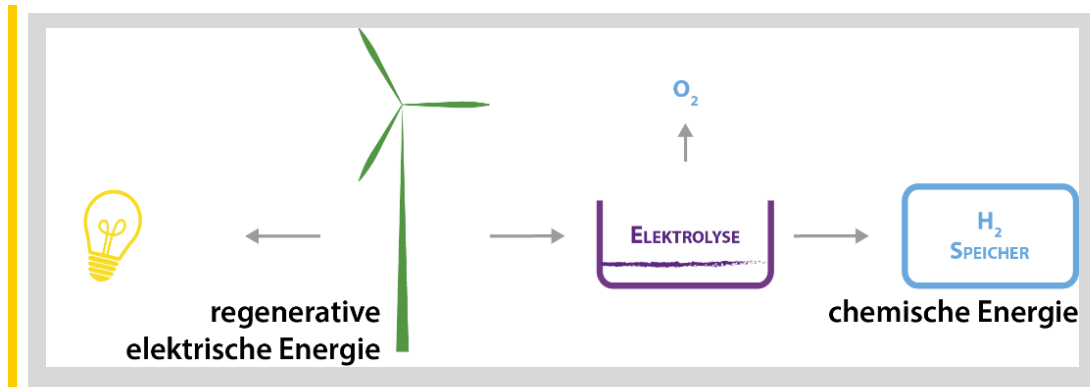


Abbildung 2.21: Schematische Darstellung der Wasserstoffelektrolyse

Mithilfe von elektrischem Strom wird Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten. Daraus geht hervor, dass die Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse CO<sub>2</sub>-neutral möglich ist, sofern der benötigte Strom aus erneuerbaren Energien verwendet wird. Der Vorgang selbst findet im sogenannten Elektrolyseur statt. Je nach Typ benötigt dieser eine Anschlussleistung von etwa 2,6 kW/kg zu erzeugendem Wasserstoff<sup>4</sup>. Je nach Flottengröße und Verbrauch ergeben sich entsprechend hohe Leistungsbedarfe.

Aufgrund des hohen Energiebedarfs ist die Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse nur bei geringen Strombezugskosten wirtschaftlich darstellbar. Weiterhin sollte die Lebensdauer der Stacks bei einer Kostenaufstellung berücksichtigt werden. Diese liegt bei etwa 10 Jahren und damit geringfügig unter der gängigen Einsatzdauer von Bussen, die etwa 12 bis 14 Jahre beträgt. Ob ein Austausch oder eine Überholung der Stacks notwendig ist, ist modellabhängig. Grundsätzlich verschlechtert sich die Effizienz der Stacks mit rd. 0,8 bis 1 % p.a. und man kalkuliert den höheren Stromverbrauch im Vergleich zu den Ersatzkosten. Ein möglicher Wechsel muss daher ebenso in die Kostenbilanz eingehen, wie die Wartungsarbeiten an Verdichter, Elektrolyseur und Druckbehältern.

Auch Mischformen aus On-Site-Erzeugung und Anlieferung sind möglich.

Sollen viele Fahrzeuge (>> 50) auf einem Busdepot mit Wasserstoff versorgt werden, müssen entsprechend große Mengen vorgehalten werden. Je nach Tankstellengröße können unterschiedliche rechtliche Bestimmungen gelten. Dies hat Auswirkungen auf die notwendigen Sicherheitsabstände, welche in der Norm „Technische Regeln für Betriebssicherheit (TRBS 3151)“ geregelt sind. In Sonderfällen kann die Tankstelle als Störfallanlage eingeordnet werden, was gesonderte Sicherheitsabstände bedeutet.

<sup>4</sup> Quelle | [https://www.xn--starterset-elektromobilit-4hc.de/content/1-Bausteine/5-OEPNV/now\\_leitfaden\\_einfuehrung-wasserstoffbusse.pdf](https://www.xn--starterset-elektromobilit-4hc.de/content/1-Bausteine/5-OEPNV/now_leitfaden_einfuehrung-wasserstoffbusse.pdf) S. 21

### Technologische Grundlagen

Die rechtliche Grundlage der Genehmigung unterscheidet zwischen einer Liefer-H<sub>2</sub>-Tankstelle und einer größeren H<sub>2</sub>-Tankstelle ggf. in Kombination mit einer Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse. Erstere beinhaltet einen Wasserstoffspeicher von  $\leq 3$  t H<sub>2</sub> und verzichtet auf eine On-Site-Erzeugung. Hier gilt die Landesbauordnung (BauO) sowie die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV). Im zweiten Falle bei einer Wasserstoffspeicherung von  $> 3$  t H<sub>2</sub> und/oder On-Site-Erzeugung sind das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und die Betriebssicherheitsverordnung zu berücksichtigen sowie ein Baugenehmigungsverfahren nach der Landesbauordnung durchzuführen. Aus diesen gegebenen Randbedingungen ergeben sich insbesondere für dicht bebaute Betriebshöfe Ausschlusskriterien bei der Wahl möglicher Standorte auf dem Betriebshof.

Verschiedene Hersteller bieten mit „mobilen“ Wasserstofftankstellen eine weitere Möglichkeit zur Betankung an. Regulatorisch werden mobile Systeme wie ortsfeste Anlagen behandelt. Ein entsprechender Planungshorizont bei mobilen Liefer-H<sub>2</sub>-Tankstellen ist für die Erlaubniserteilung einzuplanen. Ist die Anlage herstellerseitig verfügbar, ist von bis zu 6 Monaten bis zur Erlaubniserteilung auszugehen. In Einzelfällen kann je nach Anlagenhersteller und Bundesland die Erlaubniserteilung deutlich unter 6 Monaten liegen. Mobile Systeme können eine zeitweise Back-up-Lösung, z. B. bei Ausfällen der ortsnahen Wasserstoffinfrastruktur, bieten.

## Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

### 3 Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

#### 3.1 Methodik

Das Vorgehen zur Datenerhebung setzt die Vorgaben der Kooperation der *Landesgruppe Ost* des *Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen* und dem *Ministerium für Infrastruktur und Landesplanung (MIL)* in direkter Art und Weise um.

Diese informieren am 15.09.2022 die **Verkehrsunternehmen** via E-Mail und fordern sie zur aktiven Teilnahme an der Studie auf. Dabei wird deutlich darauf hingewiesen, dass bei der Beantwortung mittels Erhebungsbogens eine intensive Abstimmung mit dem jeweiligen Aufgabenträger erfolgen soll.

Die **Aufgabenträger** werden am 09.09.2022 vom MIL im Rahmen einer Sondersitzung der AG Aufgabenträger über die Erhebung informiert sowie nachfolgend mit einem Schreiben vom 13.09. 2022 um Unterstützung der Abfrage gebeten.

Die Adressaten der Abfrage decken den Großteil der kommunalen Unternehmen im Land ab. Sie setzen insgesamt zusammen mehr als 1.200 Busse ein. Darunter befinden sich auch die VDV-Mitglieder bzw. deren Aufgabenträger, deren Bediengebiet ca. 80 % der Fläche des Landes abdeckt.

##### 3.1.1 Erhebungsbogen

Die Datenabfrage basiert auf einem Erhebungsbogen, der die Instanzen **Fahrzeuge** und **Infrastruktur** jeweils getrennt nach Bestand und geplanter Beschaffung behandelt. Excel-basiert wird dem Nutzer an relevanten Stellen über eine Dropdown-Auswahl der Ausfüllvorgang erleichtert. In der Anlage 1 - Datenabfrage sind ausschnittweise die verwendeten Vorlagen abgebildet.

Bei den Fahrzeugen werden deutlich detailliertere Informationen als bei der Infrastruktur abgefragt. Dazu zählen beispielsweise Fahrzeugtyp, Baujahr und Zulassungsjahr, Antriebsart, Abgasnorm sowie Angaben zum geplanten Datum der Aussonderung. Gleichfalls werden Eigenschaften des geplanten Nachfolgefahrzeugs thematisiert. Diese Detailtiefe ist notwendig, um direkt Rückschlüsse zur CVD-Konformität schließen zu können. Hinsichtlich der Infrastruktur enthält die CVD keinerlei Beschaffungsvorgaben.

##### 3.1.2 Ablauf der Erhebung

Als zeitlicher Rahmen wird zunächst der 01.11.2022 als Einsendeschluss benannt (der Beginn war der in Absatz 3.1 genannte 15.09.2022). Eine spätere Erinnerung zum 01.11.2022 gewährt den säumigen Vertretern noch einmal eine weitere Woche Zeit bis

## Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

zum 08.11.2022 zur Übermittlung ihrer abgefragten Informationen. Insgesamt sind damit **über 7 Wochen Zeit** für die Teilnehmer die angefragten Daten bereitzustellen.

### 3.2 Datenauswertung

Die geschaffene Datengrundlage beinhaltet die Angaben von 13 der insgesamt 16 angefragten brandenburgischen Verkehrsunternehmen (VU).

Im Folgenden werden die übermittelten Informationen aufbereitet und aggregiert dargestellt.

#### 3.2.1 Fahrzeugbestand

In den Flotten der 13 VU befinden sich aktuell in Summe **1.121 Busse**.

Insgesamt **890 Busse** (79 %) sind nach Fahrzeugklasse M3 Aufbauart **Klasse I** abgenommen. **231 Fahrzeuge** (21 %) gehören zu der Fahrzeugklasse M3 Aufbauart **Klasse II** und sind somit aktuell von den Quotenvorgaben der CVD explizit ausgenommen.

Die Fahrzeugtypen verteilen sich auf 29 **Minibusse**, 33 **Midibusse**, 788 **Standardbusse**, 27 **3-Achs-Standardbusse**, 221 **Gelenkbusse**, 9 **4-Achs-Gelenkbusse** sowie 14 andere Typen. Den größten Anteil machen demnach der Standard- (70 %) und mit etwas Abstand der Gelenkbus (20 %) aus.

Es kommen bislang die Antriebstechnologien **Diesel** (874), **Dieselhybrid** (35), **Syndiesel** (179), **Gas** (16), **batterieelektrisch** (3), **Oberleitungsbus** (12) sowie **Brennstoffzellenbus** (2) zum Einsatz. Für die alternativ angetriebenen, emissionsfreien Fahrzeuge lassen sich bislang entsprechend keine klaren Technologietendenzen ausmachen, ihr Anteil beträgt 1,5 %.

#### 3.2.2 Fahrzeugbeschaffung

Aus den Angaben der Datengrundlage zur geplanten Fahrzeugbeschaffung lassen sich, geteilt nach den beiden Referenzzeiträumen, die CVD-Konformitäten ableiten. D.h. es kann eingeschätzt werden, ob nach dem aktuellen Beschaffungsplan die Quotenvorgabe der CVD eingehalten wird. Diese Einschätzung basiert auf zwei Faktoren:

- ▶ einerseits nach den Vorgaben aus dem Verkehrsvertrag oder dem öffentlichen Dienstleistungsauftrag und
- ▶ andererseits nach der Beschaffung. Dabei ist es unabhängig davon, ob Fahrzeuge neu, gebraucht oder geleast sind.

Jene öffentliche Dienstleistungsaufträge für ÖPNV-Verkehrsleistungen, die vor dem 02.08.2021 abgeschlossen wurden, fallen nicht unter den Anwendungsbereich des Gesetzes (§ 10 SaubFahrzeugBeschG). Erfasst werden nur solche Aufträge, bei denen die



## Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

Auftragsbekanntmachung nach dem 02.08.2021 veröffentlicht wurde bzw. der Aufruf zum Wettbewerb nach dem 02.08.2021 ergangen ist.<sup>5</sup>

Die aktuell noch laufenden brandenburgischen Dienstleistungsaufträge **sind allesamt davon nicht betroffen**. Sie laufen noch bis ins Jahr 2025 (teilweise bis ins Jahr 2026). Der erste Faktor zur Einschätzung der CVD-Konformität ist damit für alle Teilnehmer positiv zu bewerten. Je nach realisierter Zeitkette müssten die darauffolgenden Aufträge die Quoten des ersten Referenzzeitraumes oder die des Zweiten erfüllen.

Es bleibt die Einschätzung der Fahrzeugbeschaffung übrig, welche ebenfalls getrennt nach den beiden Referenzzeiträumen vorzunehmen ist. Insgesamt **6 VU** erfüllen nach derzeitigem Kenntnisstand bereits im ersten Referenzzeitraum die CVD-Vorgaben. Dieser Wert steigt im zweiten Zeitraum noch auf **9 VU** an. Dabei ist anzumerken, dass mehrere Teilnehmer bislang keine Fahrzeugbeschaffung nach Beendigung des ersten Zeitraumes ausgewiesen haben.

**2 VU** bleiben bei dieser Einschätzung außen vor, denn sie betreiben selbst keine Fahrzeuge. Die Tabelle 6 fasst die Angaben zur Konformität abschließend zusammen.

| CVD-Konformität | 1. Referenzzeitraum | 2. Referenzzeitraum |
|-----------------|---------------------|---------------------|
| Ja              | 6                   | 9                   |
| Nein            | 5                   | 2                   |

Tabelle 6: CVD-Konformität der befragten Unternehmen bzgl. der Beschaffung

Im nächsten Schritt werden alle VU zusammengefasst und die CVD-Konformität für das Land Brandenburg in Gänze eingeschätzt. Die Abbildung 3.1 zeigt in diesem Zusammenhang alle geplanten und durchgeführten Fahrzeugbeschaffungen von 2021 bis 2037, getrennt nach Jahresscheiben und weist die jeweilige Antriebsart zu. In der Anlage 2 – Fahrzeugbeschaffungen für das Jahr 2021 ff. sind die dazugehörigen Zahlen detailliert in tabellarischer Form aufgeführt.

## Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

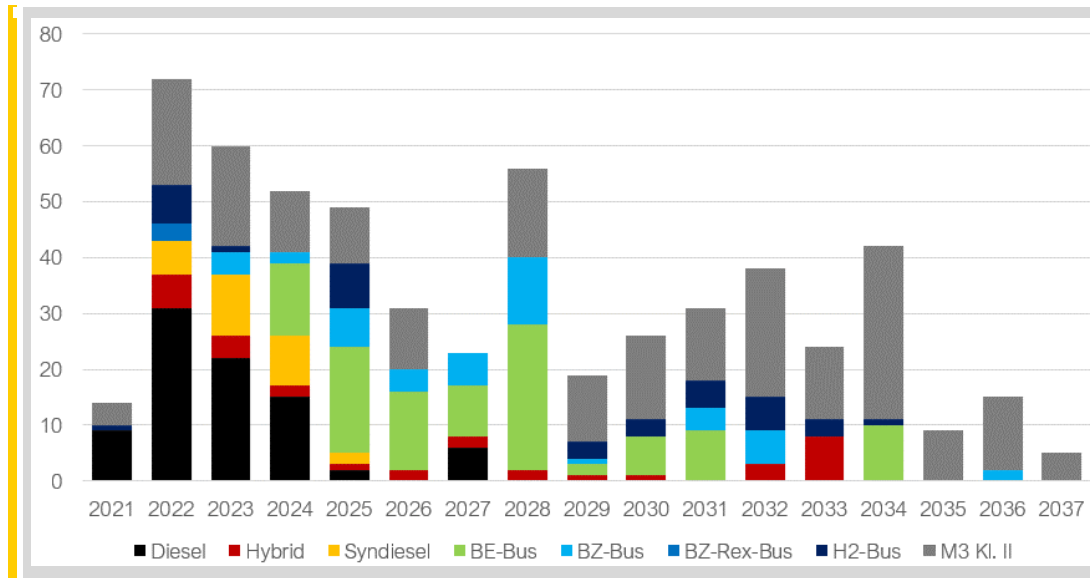


Abbildung 3.1: Verteilung der Fahrzeugbeschaffung nach Jahresscheiben

Für den ersten Referenzzeitraum ergibt sich ein Anteil **sauberer Fahrzeuge** (emissionsfreie Fahrzeuge entsprechend CVD-Definition in der Zählung inkludiert) von **50 %** und ein Anteil **emissionsfreier Fahrzeuge** von **35 %**. Damit wird die CVD-Quotenvorgabe, bezogen auf die ausgewertete Stichprobe der 13 VU, eingehalten.

Im zweiten Referenzzeitraum steigt der Anteil **emissionsfreier Fahrzeuge** im Rahmen von Beschaffungen nach den Erhebungsergebnissen auf **86 %** an, wohingegen keine sauberen Fahrzeuge beschafft werden. Auch für diesen Zeitabschnitt werden die gesetzlich geforderten Ziele, ebenfalls bezogen auf die ausgewertete Stichprobe von 13 VU, erreicht.

### Beschaffungen in den Jahren 2021-2023

Für die kommenden Berichtspflichten zur Anzahl der beschafften Fahrzeuge je Jahresscheibe sind die folgenden Werte zu erwarten (siehe Tabelle 7). Sie gehen ebenfalls aus der übermittelten Datengrundlage hervor und beschränken sich demnach auf die beschriebene Stichprobe. Bei der Aufzählung werden saubere und emissionsfreie Fahrzeuge exklusiv geführt.

| Jahr | Saubere Fahrzeuge | Emissionsfreie Fahrzeuge | gesamt |
|------|-------------------|--------------------------|--------|
| 2021 | 0                 | 1                        | 33     |
| 2022 | 6                 | 10                       |        |
| 2023 | 11                | 5                        |        |

Tabelle 7: Fahrzeugbeschaffung für die Jahre 2021-2023

## Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

### 3.2.3 Infrastrukturbestand

Die brandenburgischen VU nutzen aktuell **47 Betriebshöfe**/Betriebshofstandorte, die sich in ihrer Ausprägung und Funktionalität unterscheiden. D.h. nicht überall gibt es eine Werkstatt auf dem Gelände. Wenn Werkstätten vorhanden sind, unterscheiden sich diese in der dort wahrgenommenen Instandhaltungstiefe.

Die genannten Betriebshöfe bieten eine Abstellkapazität von **583** Fahrzeugen auf der freien Fläche (**offen**), weitere **119 überdachte** (Carport) und **736 geschlossene** Plätze (Garage). In Summe können **1.438 Fahrzeuge** abgestellt werden. Damit gibt es theoretisch mehr Stellplätze als Fahrzeuge im Bestand (siehe Abschnitt 3.2.1). In der Praxis stimmt die räumliche Verteilung der Stellplätze allerdings nicht automatisch mit dem lokalen Bedarf überein.

In den vorhandenen Werkstätten können insgesamt **142 Fahrzeuge** bearbeitet werden. Bezogen auf die Stellplatzanzahl entspricht dies in etwa einer Kapazität von 10 %.

Zur Versorgung der Flotten betreiben alle VU, bis auf eines, entsprechende Energieversorgungsinfrastruktur. Darunter befinden sich **51 Dieseltankstellen**, **2 Erdgastankstellen** und **4 Wasserstofftankstellen**. Ergänzt werden sie von **28 Ladepunkten**, wobei 17 davon für die Versorgung von Pkw konzipiert sind.

### 3.2.4 Infrastruktur in Planung

Infrastrukturseitig sind von den VU unterschiedliche Projekte geplant. Sie lassen sich in die drei folgenden Gruppen untergliedern:

- ▶ Betriebshofumbau mit Anpassung der Werkstatt an Bedürfnisse der Fahrzeuge mit alternativen Antrieben oder Betriebshofneubau; jeweils mit Anpassung der Abstellungen,
- ▶ Errichtung von Ladeinfrastruktur sowie
- ▶ Errichtung von Wasserstoff-Tankinfrastruktur.

#### Betriebshöfe

Innerhalb der Jahre 2023 bis 2026 planen die VU **11 Projekte** mit direktem Betriebshofbezug. Der finanzielle Umfang wird mit etwa **120 Mio. €** abgeschätzt, wobei 3 Projekte ohne Kostenindikation enthalten sind. Diese kämen folglich beim Kostenrahmen noch hinzu.

Knapp die Hälfte der Projekte weist einen direkten Bezug zur Wasserstofftechnologie auf. Dabei sollen Wartung, Instandhaltung und Abstellung für die speziellen Anforderungen ertüchtigt werden.

### Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

#### Ladeinfrastruktur

Für die Jahre 2024 bis 2026 sind **6 Projekte** zur Errichtung von Ladeinfrastruktur geplant. Das benannte Investitionsvolumen liegt bei **1,23 Mio. €**, wobei auch diese Angaben 4 Projekte ohne Kostenindikation enthalten. Eine konkrete Anzahl an Ladepunkten wird nicht ausgewiesen.

#### Tankinfrastruktur (Wasserstoff)

Insgesamt **14 Projekte** adressieren die Errichtung von Wasserstofftankstellen mit einem Gesamtinvestitionsvolumen von **26,46 Mio. €**. Der Realisierungszeitraum umfasst die Jahre 2023 bis 2028.

### 3.3 Synergieeffekte – gemeinsame Nutzung von Infrastruktur

Aus der Erfahrung vorangegangener Projekte geht hervor, dass bestimmte Energieinfrastruktur bei lokaler Nähe synergetisch genutzt werden kann. Dies gilt insbesondere für Wasserstoffinfrastruktur, bei der eine gesteigerte Abnahmemenge gezielt zu Kosteneinsparungen (bezogen auf 1 kg Wasserstoff) führen kann.

Bei der Ladeinfrastruktur sind eher Diskrepanzen durch eine gemeinsame Nutzung zu erwarten. Diese resultieren aus längeren Standzeiten bei Ladevorgängen sowie der korrekten (geeichten) Zuordnung von Energiemengen.

Die folgende Übersicht fasst Wasserstoff-Tankinfrastruktur und -Projekte zusammen.

#### Vorhandene Wasserstofftankstellen

- ▶ drei Tankstellen in Berlin im Betrieb, zwei im Bau
- ▶ Tankstellen in Berlin überwiegend an Ausfallstraßen außerhalb des S-Bahn-Ring
- ▶ zwei Tankstellen in Betrieb in Brandenburg (Potsdam und Neuruppin)
- ▶ ein Wasserstoffzentrum der *ENERTRAG* im Bau (Prenzlauer Norden)
- ▶ keine Tankstellen im Süden von Brandenburg

#### Wasserstoffstrategie (H<sub>2</sub>-Marktplatz)

- ▶ Interessierte könne ihre Wasserstoffprojekte auf dem H<sub>2</sub>-Marktplatz veröffentlichen
- ▶ mehrere Landkreise planen Projekte zur Herstellung von Wasserstoff, Ausnahme: Landkreis Oder-Spree
- ▶ Projekte mit den höchsten Mengen an Wasserstoff vor allem in der Lausitz geplant
- ▶ größere Pipeline-, Speicher- und Erzeugungsprojekte um und in Berlin geplant, Bsp.: bei Michendorf (südlich von Potsdam),

## Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

- ▶ „doing hydrogen“-Projekt: 616 km Leitungen mit Hauptstrang zwischen Region Rostock und Mitteldeutschland, davon Wasserstoffnetz von 440 km in Brandenburg



Abbildung 3.2: Darstellung des geplanten Wasserstoffnetzes [doinghydrogen.com]

### Auswahl an Wasserstoffprojekten

#### Landkreis Barnim (Heidekrautbahn)

- ▶ Dekarbonisierung der Heidekrautbahn mit Wasserstoff ab 2024
- ▶ Bereitstellung des Wasserstoffes vor Ort mit Strom aus Windkraft
- ▶ Kapazitäten auch in Zukunft nutzbar für Wasserstoffantrieb von Bussen und Abfallsammelfahrzeugen

#### HyCAVmobil

- ▶ Unterspeicher von 100 % Wasserstoff in Rüdersdorf bei Berlin
- ▶ Vorreiterprojekt in über 1.000 m Tiefe in sogenanntem Kavernenspeicher

### Power-to-X Projekte in Brandenburg

- ▶ Hybridkraftwerk Prenzlau (Tankstelle in Planung)
- ▶ WindGas Falkenhagen (360 m<sup>3</sup>/h Wasserstoff)

#### Planungsregion Prignitz-Oberhavel

- ▶ Potentialstudie zu möglichen Standorten, Definition Schwerpunkte und Projekte zu Wasserstoff
- ▶ Projekt 1: Klimaneutrale Industrie am Autobahndreieck Wittstock-Dosse (1.300 – 5.400 t Wasserstoff jährlich)

### Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

- ▶ Projekt 2: H<sub>2</sub>-Hubs für ländliche Mobilität an der Bahnstrecke der RB73 / RB74 (110 - 410 t Wasserstoff jährlich, Tankstellen für Busse inkludiert, Weiterentwicklung des Forschungsprojektes H2Rail Prignitz)
- ▶ Projekt 3: Elektrolyse als chemischer Stromspeicher in Prignitz (290 t Wasserstoff jährlich)

### East Energy

- ▶ Bio-Methanolwerk in Gransee. Herstellung mit grünem Wasserstoff aus Photovoltaikstrom

### ProoH2V

- ▶ Wasserstoffnetzwerk für Prignitz-Ruppin-Oberhavel
- ▶ Tankstelle in Südoberhavel geplant

### Wasserstoffinitiative H2VL

- ▶ Landkreis Havelland, Gewinner der Phase 2 des HyLand-Wettbewerbes des Bundesverkehrsministeriums
- ▶ Energiewendelabor in Ketzin, Potential für Wasserstoff
- ▶ Entwicklung in Premnitz von einem Plasmavergasungsverfahren

### Wasserstoffregion Uckermark-Barnim

- ▶ Neben dem Projekt in Prenzlau, auch Projekt in Barnim für Busse und Abfallsorgung mit Wasserstoff

Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

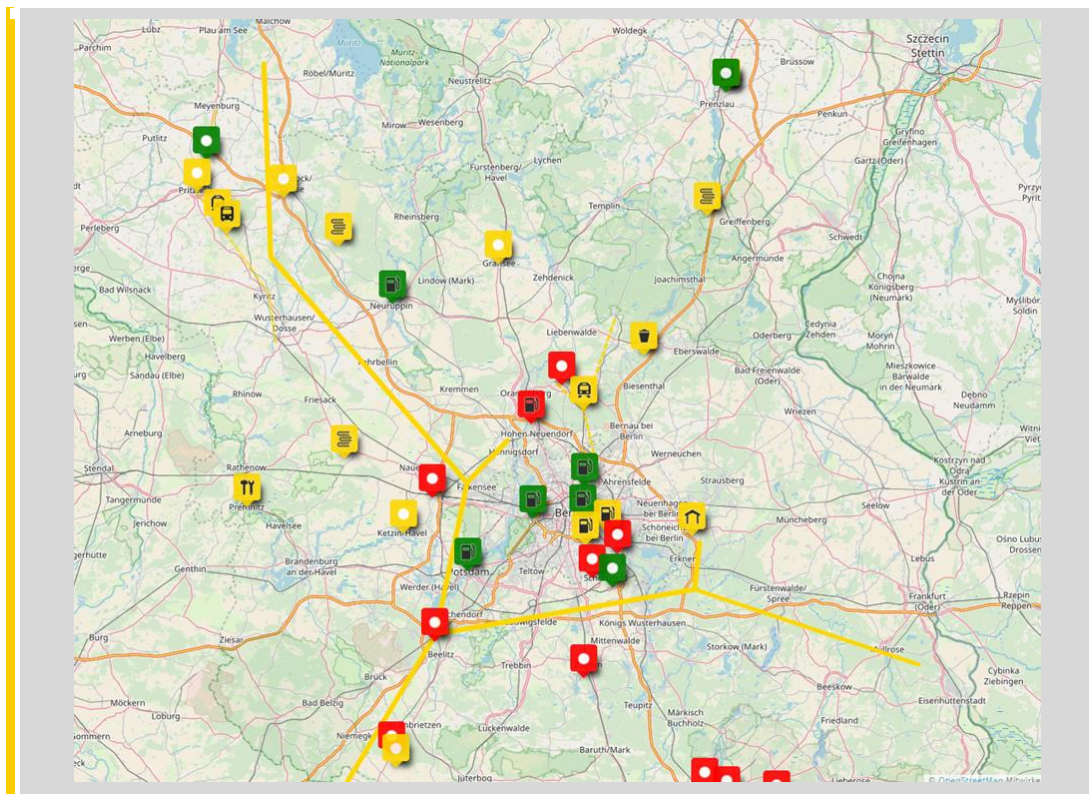


Abbildung 3.3: Projekte mit Wasserstoffbezug in der Region Berlin-Brandenburg  
[localiser.de/h2marktplatzbb]

**Legende:**

Stecknadel mit Kreis - Wasserstoffherstellungsprojekt

Grün – in Betrieb | Gelb – in Bau/Planung (konkreter Zeitplan) | Rot – in Evaluierung

- Wasserstoffkonzeptstudien in Planungsregion

- Wasserstofftankstellen

- Abfallentsorgung mit Wasserstoffantrieb

- Regionalbahnlinie mit Wasserstoffantrieb

— - Verlauf Regionalbahnlinie mit Wasserstoffantrieb

- Bustankstelle an Regionalbahnprojekt

- Wasserstoffspeicher

- Forschung an Wasserstoffherstellungsverfahren

— - Pipelineprojekt für Wasserstoff

## Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

Neben den Wasserstoffprojekten sind noch weitere, relevante Projekte aus dem Bereich der erneuerbaren Energien in Brandenburg angesiedelt. Die folgende Übersicht fasst Projekte / Aussagen zu Windkraftanlagen sowie Photovoltaik-Großanlagen zusammen.

### Erneuerbare Energien [Energieatlas Brandenburg]

Windkraftanlagen sind vor allem im Norden und im Süden von Brandenburg positioniert. Die aktuellen Planungen verteilen sich zunehmend gleichmäßig in der Fläche. Die folgende Tabelle fasst die Anlagen getrennt nach ihrer Positionierung im jeweiligen Landkreis bzw. der kreisfreien Stadt zusammen.

| Landkreis /<br>kreisfreie<br>Stadt | Windkraftanlagen |                               |                         | Photovoltaik-<br>Großanlagen |
|------------------------------------|------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------------|
|                                    | in Betrieb       | in Genehmigungs-<br>verfahren | vor Inbetrieb-<br>nahme |                              |
| Oberhavel                          | 77               | 3                             | 0                       | 8                            |
| Uckermark                          | 657              | 71                            | 50                      | 12                           |
| Barnim                             | 145              | 25                            | 22                      | 17                           |
| Märkisch-<br>Oderland              | 254              | 86                            | 26                      | 35                           |
| Frankfurt<br>(Oder)                | 13               | 5                             | 0                       | 4                            |
| Oder-Spree                         | 122              | 28                            | 48                      | 26                           |
| Dahme-<br>Spreewald                | 298              | 47                            | 16                      | 8                            |
| Spree-Neiße                        | 99               | 36                            | 17                      | 29                           |
| Cottbus                            | 32               | 0                             | 0                       | 6                            |
| Oberspree-<br>wald-Lausitz         | 173              | 10                            | 10                      | 31                           |
| Teltow-<br>Fläming                 | 373              | 34                            | 20                      | 24                           |
| Potsdam-<br>Mittelmark             | 203              | 41                            | 43                      | 12                           |
| Prignitz                           | 607              | 31                            | 40                      | 13                           |

Tabelle 8: Windkraft- und Photovoltaikanlagen der Landkreise [Energieatlas Brandenburg]



Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

### 3.4 Beschaffungs- und Umrüstungsbedarf

#### 3.4.1 Beschaffungsbedarf Fahrzeuge

Aus der übermittelten Datengrundlage gehen nicht nur die geplanten Neubeschaffungen von Fahrzeugen hervor – diese Angaben sind ggf. unvollständig, da sie gewissen Unsicherheiten (Förderanträge noch ohne Rückmeldung) unterliegen und die VU sich unterschiedlich dazu entschlossen haben, diese Zahlen bewusst mit aufzunehmen oder bewusst wegzulassen – sondern auch die geplante Ausmusterung von Bestandsfahrzeugen. Letztere hängt direkt mit verschiedenen, teilweise selbst definierten strategischen Vorgaben der VU, wie z. B. dem maximalen durchschnittlichen Flottenalter, der Fahrzeugverfügbarkeit oder auch der Kundenzufriedenheit, zusammen. Demzufolge werden diese Angaben als belastbarer eingeschätzt.

Anhand der geplanten Ausmusterungsjahre wird nun geteilt nach CVD-Referenzzeiträumen der Beschaffungsbedarf an Fahrzeugen im Land Brandenburg abstrahiert. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass nur die beiden am häufigsten vertretenen Gefäßgrößen beschafft werden müssen, d.h. 70 % Standard-/ Solobusse und 20 % Gelenkbusse.

| '21                  | '22 | '23 | '24 | '25 | '26                  | '27 | '28 | '29 | '30 |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|----------------------|-----|-----|-----|-----|
| 14                   | 74  | 70  | 59  | 59  | 36                   | 46  | 79  | 32  | 19  |
| Referenzzeitraum 1   |     |     |     |     | Referenzzeitraum 2   |     |     |     |     |
| Summe: 276 Fahrzeuge |     |     |     |     | Summe: 212 Fahrzeuge |     |     |     |     |
| 194 Solo, 56 Gelenk  |     |     |     |     | 148 Solo, 42 Gelenk  |     |     |     |     |

Tabelle 9: Anzahl auszumusternde Fahrzeuge in Jahresscheiben und nach CVD-Referenzzeitraum

Für den Referenzzeitraum 1 ergibt sich demnach ein Beschaffungsbedarf von 276 Fahrzeugen in Summe. Anteilig macht das Gros der Solobus aus (132 Stück), es folgt der Gelenkbus mit 56 Einheiten.

Im Referenzzeitraum 2 müssten insgesamt 212 Fahrzeuge beschafft werden. Davon entfallen 148 Einheiten auf den Solo- und 42 Einheiten auf den Gelenkbus.

#### 3.4.2 Umrüstungsbedarf Lade- und Tankinfrastruktur

Der ÖPNV zählt zur Daseinsfürsorge und gehört zur kritischen Infrastruktur. Damit kann er z. B. im Katastrophenfall über das Verkehrsleistungsgesetz (VerkLG) zur Erbringung entsprechenden Verkehrsleistungen verpflichtet werden. Folglich müssen Verkehrsleistungen robust erbracht werden können. Diese Vorgabe muss gleichfalls von alternativ

### Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

angetriebenen Bussen erfüllt werden können. Die Umstellung auf alternative Antriebe beeinflusst folglich nicht nur die Fahrzeuge, sondern auch die Versorgungsinfrastruktur. Bislang genügte eine Tankstelle mit hinreichend großem Kraftstofftank (teilweise Bevorratung für bis zu 10 Betriebstage), die im Notfall auch mit Notstromaggregaten betrieben werden kann.

#### Laden

Bei Batteriebussen empfiehlt es sich, unabhängig vom gewählten Einsatzszenario als Gelegenheits- oder Depotlader, **für jeden Bus einen Ladepunkt** in der Abstellung bereitzuhalten. Somit kann zudem der nach aktuellem Stand der Technik obligatorische Ausgleich einzelner Batteriezellstränge, sogenanntes Balancing, gewährleistet werden. Weitere Freiheitsgrade im Betrieb können durch zusätzliche Schnellladestationen auf dem Betriebshof oder an strategisch günstigen Punkten im BetreiberNetz gehoben werden.

Als Ladeinfrastruktur wird übergeordnet das Zusammenspiel von mehreren Komponenten bezeichnet. Dazu zählen:

- ▶ Mittelspannungsübergabestation,
- ▶ Transformator,
- ▶ ggf. Niederspannungsunterverteilung,
- ▶ Ladegerät,
- ▶ Ladeschnittstelle,
- ▶ Ladepunkt sowie ein
- ▶ Lademanagementsystem.

#### Tanken

Aktuelle Brennstoffzellenbusse nutzen mehrheitlich ein Druckniveau von 350 bar und sind damit inkompatibel zur etablierten Pkw-Tankinfrastruktur, die mit 700 bar arbeitet. Es empfiehlt sich der Aufbau einer eigenen Tankstelle. Diese kann ortsveränderlich oder ortsfest ausgeführt werden und besteht aus den Komponenten:

- ▶ Hochtanks (und oder liegende Speichertanks),
- ▶ Verdichter,
- ▶ ggf. Trailerstellplatz sowie
- ▶ Dispenser.

Bei der Errichtung einer Tankstelle müssen neben dem eigentlichen Platzbedarf noch Sicherheitsabstände und Vorgaben zu Lärm beachtet werden.

Eine Tankstelle kann mehrere Fahrzeuge mit Wasserstoff versorgen. Dabei ist zu beachten, dass für einen Tankvorgang die jeweils notwendigen Druckniveaus zur Verfügung stehen. Die sogenannte Back-To-Back Kapazität gibt an, wie viele Fahrzeuge direkt

---

## Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

nacheinander von der gleichen Infrastruktur versorgt werden können. Sie hängt maßgeblich mit der Verdichterkapazität zusammen.

Wird der Tankvorgang nicht von der Verdichterkapazität limitiert, kann jeder Dispenser überschlägig **pro Stunde vier bis fünf Fahrzeuge** mit Wasserstoff versorgen.

### 3.4.3 Erweiterungsbedarf der Werkstätten, Betriebsstätten und Betriebshöfe

Werkstätten, Betriebsstätten und Betriebshöfe umfassen verschiedene Bestandteile, die für den Betrieb einer Busflotte notwendig sind. Dazu gehören im Wesentlichen [VDV-Schrift 825]:

- ▶ Fahrzeug-Versorgung, -Außenreinigung, -Unterbodenreinigung, -Innenreinigung,
- ▶ Bremsprüfung, Abgasuntersuchung (AU), Fahrtschreiber,
- ▶ Karosserie- und Lackierarbeiten, Instandsetzung (Mehrfachnutzung),
- ▶ zusätzliche Zapfstelle,
- ▶ spezielle Werkstattfläche, spezielle Werkstatträume,
- ▶ Sozialräume für Werkstattpersonal,
- ▶ Stauraum,
- ▶ Abstellanlage,
- ▶ Betriebsdienstgebäude,
- ▶ Abstellplätze Dienst-/Besucherfahrzeuge, Pkw-Parkplätze und Zweiradständer,
- ▶ Ein- und Ausfahrt, Not-Ein-/Ausfahrt.

Einige dieser Bestandteile **müssen einer Anpassung oder Erweiterung unterzogen werden**, damit sie für die Anforderungen der Fahrzeuge mit alternativen Antrieben gerüstet sind. Folgende Dinge sind unter anderem zu beachten:

- ▶ Anforderung und Ausführung Abstellanlage (Integration von Ladeinfrastruktur),
- ▶ Abstände zwischen den Bussen (siehe aktuelle Fassung VDV-Schrift 825),
- ▶ Werkstattelemente (Anzahl der Arbeitsstände, Dacharbeitsstände, Abmessungen der Arbeitsstände, Spezialwerkzeug),
- ▶ Hochvolt-Werkstattbereich,
- ▶ Ladeinfrastruktur,
- ▶ Wasserstoff-Tankinfrastruktur,
- ▶ Havariefläche,
- ▶ Prüfstände sowie
- ▶ ein geändertes / angepasstes Brandschutzkonzept.

Zusammenfassend kommt es zu einem Flächenmehrbedarf, bei gleicher Anzahl abgestellter Fahrzeuge auf dem Betriebshof. Für den Umfang des auftretenden Mehrbedarfs spielen sowohl die konkrete technische Umsetzung der gewählten Technologie (Redundanzen, Betriebsreserve) als auch das geplante Betriebskonzept (Abstellung,

### Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

Brandschutz, beabsichtigte Instandhaltungstiefe der Werkstatt) eine entscheidende Rolle.

## 3.5 Investitionskosten Fahrzeuge

Mit den Fahrzeugen aus dem Abschnitt 3.4.1 in Verbindung mit dem genannten Preisrahmen für Batterie- und Brennstoffzellenbusse (siehe Tabelle 2 und Tabelle 3, Festlegung auf einen indikativen Preis innerhalb des genannten Rahmens) lässt sich ein Investitionsaufwand abschätzen. Dabei wurde bewusst auf die Berücksichtigung der, zurzeit nur schwer abzuschätzenden, Preisentwicklung mit Blick auf den Zeithorizont bis 2030 verzichtet. D.h. es werden für beide Referenzzeiträume identische Fahrzeugpreise angesetzt. Weiterhin werden nur Fahrzeuge betrachtet, die zukünftig, also ab 2023 beschafft werden. Folgende Rechenbeispiele greifen die Grunddaten auf:

### Batteriebus

Referenzzeitraum 1

Solobus 132 x 600.000 € = 79.200.000 € | Gelenkbus 38 x 750.000 € = 28.500.000 €

Referenzzeitraum 2

Solobus 148 x 600.000 € = 88.800.000 € | Gelenkbus 42 x 750.000 € = 31.500.000 €

### Brennstoffzellenbus

Referenzzeitraum 1

Solobus 132 x 600.000 € = 79.200.000 € | Gelenkbus 38 x 825.000 € = 31.350.000 €

Referenzzeitraum 2

Solobus 148 x 600.000 € = 88.800.000 € | Gelenkbus 42 x 825.000 € = 34.650.000 €

### 3.5.1 Förderbedarf

Hinsichtlich einer Förderung muss beachtet werden, dass bislang die Mehrkosten anteilig gefördert wurden, die im Vergleich zum konventionellen (Diesel-)Fahrzeug entstehen. Unter der Annahme, dass ein Diesel-Solobus 230.000 € und ein Diesel-Gelenkbus 320.000 € kosten, fehlt für die Abschätzung eines Förderbedarfs noch die anzusetzende Förderquote. In dem folgenden Szenario wird eine mögliche Quote unterstellt.

## Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

Förderquote 80 % (Bezug: Technologiebedingte Mehrkosten)

| Technologie            | Batteriebus |             | Brennstoffzellenbus |             |
|------------------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|
| Zeitraum               | bis 2025    | 2026 - 2030 | bis 2025            | 2026 - 2030 |
| Förderbedarf in Mio. € | 52,1        | 58,3        | 54,4                | 60,8        |

Tabelle 10: Fahrzeugförderbedarf bei Förderquote 80 %

### 3.6 Investitionskosten Infrastruktur

Im Folgenden wird eine Abschätzung der Investitionskosten sowohl für die Ladeinfrastruktur als auch die Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur gegeben.

#### 3.6.1 Ladeinfrastruktur

Bezüglich der Abschätzung der Kosten für die Ladeinfrastruktur (LIS) muss zwischen der Ladetechnik auf der Strecke am Endpunkt im Falle des Gelegenheitsladers als auch bei der Ladung im Depot unterschieden werden.

Um im Falle des Gelegenheitsladers eine schnelle Aufladung in der zur Verfügung stehenden Wendezeit zu ermöglichen, kommen hierbei bevorzugt höhere Ladeleistungen zum Einsatz. Dabei kann im Falle der Nachladung mittels Pantographen eine höhere Ladeleistung übertragen werden.

Exemplarisch wird hierzu der Aufbau der Ladeinfrastruktur am Endpunkt bei einer Ladeleistung von 300 kW betrachtet. Üblicherweise wird die gesamte Ladetechnik in einer Trafo-Ladetechnik-Station untergebracht mit Ausnahme des ggf. benötigten Lademasstes mit Ladehaube oder Top-Down-Pantograph und dessen Anschlusskasten. Aufgrund der benötigten Leistung erfolgt der Anschluss der LIS direkt an das Mittelspannungsnetz. Neben der dadurch benötigten Mittelspannungsanlage mit Verbrauchserfassung, dem Transformator, entsprechender Sicherungs- und Steuerungstechnik sowie Lüftung befindet sich auch das eigentliche Ladegerät im Betongebäude. Die kompakte Bauweise, die ggf. auch schon komplett bestückt per Tieflader angeliefert werden kann, kann bei örtlichen Veränderungen des Endpunktes der Linie relativ leicht auch noch einmal versetzt werden. Für die beschriebene Station ist mit Kosten in der Größenordnung von 350.000 bis 400.000 € für einen Ladepunkt zu rechnen. Wird mehr als ein Ladepunkt am Endpunkt errichtet, so skalieren die Kosten degressiv. Darüber hinaus können im Betongebäude auch separate Räumlichkeiten für das Fahrpersonal (Pausenraum, Toilette) integriert werden.

Im Land Brandenburg ist der Busverkehr in hohem Maße ländlich ausgeprägt. Die zugehörigen Attribute (große streckenbezogene Distanzen je Linie, geringere Taktdichte und

### Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

dadurch verhältnismäßig wenige Busse je Endpunkt) begünstigen eher ein Depotlader-Konzept. Auch jene Busse, die den Schülerverkehr in den frühen Morgenstunden und zur Mittags- / Nachmittagszeit realisieren, lassen sich eher als Depotlader auslegen.

In der Folge wird für die Schätzung der Investitionskosten für Gelegenheitslader-Konzepte angenommen, dass nur 30 % aller Fahrzeuge entsprechende Infrastruktur auf der Strecke benötigen. Weiterhin wird unterstellt, dass ein Ladepunkt insgesamt 5 Fahrzeuge auf einer Linie an einem Endpunkt versorgen kann.

#### Gelegenheitslader

Referenzzeitraum 1

$$((\text{Solobus } 132 + \text{ Gelenkbus } 38) \times 0,3 / 5) * 375.000 \text{ €} = 3.750.000 \text{ €}$$

Referenzzeitraum 2

$$((\text{Solobus } 148 + \text{ Gelenkbus } 42) \times 0,3 / 5) * 375.000 \text{ €} = 4.125.000 \text{ €}$$

Sowohl für den Gelegenheitslader als auch für den Depotlader ist eine Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof zu errichten. Für die Dimensionierung und Auslegung der benötigten LIS ist eine Ermittlung des zeitlichen Energiebedarfs basierend auf den zu bewältigenden Laufleistungen vorzunehmen. Eine typische Ladeleistung für einen Depotlader liegt im Bereich von 50 bis 100 kW pro Ladepunkt. Die Wahl der benötigten Leistung hängt von der zur Verfügung stehenden Ladeleistung sowie den gewünschten Redundanzen ab.

Die Kosten eines Ladegeräts für einen Ladepunkt mit 75 kW bewegt sich je nach technischer Ausgestaltung (Pantographen- oder Steckerladung) und auch in Abhängigkeit des Aufstellungsortes in einer Größenordnung von 25.000 bis 35.000 €.

Darüber hinaus sind entsprechende Kosten für die zusätzlich benötigte Infrastruktur zum Betrieb der eigentlichen Ladetechnik, d.h. des Ladegerätes, zu berücksichtigen. Je nach technischer Ausgestaltung bzgl. der Redundanzen (Art der Mittelspannungsanbindung, Auslegung der Transformatoren), der Aufstellung (im Freien, Carport, geschlossene Abstellung) sowie der konkreten Position der einzelnen Bestandteile der Infrastruktur auf dem Betriebshof und damit den einhergehenden zu überbrückenden Distanzen variieren diese sehr deutlich. Sie können im Vergleich zu den Kosten für das Ladegerät bis zu einer Größenordnung des doppelten der Kosten für das einzelne Ladegerät liegen und sind immer in Abhängigkeit einer ganz konkreten Umsetzungsplanung zu ermitteln.

Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

**Depotlader**

Referenzzeitraum 1

(Solobus 132 + Gelenkbus 38) \* (30.000 € + 60.000 €) = 15.300.000 €

Referenzzeitraum 2

(Solobus 148 + Gelenkbus 42) \* (30.000 € + 60.000 €) = 17.100.000 €

**Förderbedarf**

Der folgend geschätzte Förderbedarf bezieht sich auf die reine Ladeinfrastruktur ohne die etwaige Anpassung von Abstellanlagen oder ähnlichem. Als Grundlage wird beim Gelegenheitslader der Mittelwert der genannten Preisspanne angesetzt (375.000 €) und beim Depotlader der Mittelwert (30.000 €) zuzüglich des doppelten Wertes (60.000 €) für die zusätzlichen Aggregate. Beide Male wird unterstellt, dass alle noch zu beschaffenden Fahrzeuge in den Referenzzeiträumen Elektrobusse sind.

**Förderquote 80 %** (Bezug: 3. Entwurf EFRE-Richtlinie Mobilität II 2021-2027)

| Technologie            | Gelegenheitslader |             | Depotlader |             |
|------------------------|-------------------|-------------|------------|-------------|
|                        | bis 2025          | 2026 - 2030 | bis 2025   | 2026 - 2030 |
| Förderbedarf in Mio. € | 3,0               | 3,3         | 12,2       | 13,7        |

Tabelle 11: Förderbedarf der Ladeinfrastruktur

**3.6.2 Wasserstoff-Tankstellen**

Für Wasserstofftankstellen können bislang nur sehr grobe Kostenindikationen vorgenommen werden. Dies hängt maßgeblich mit der hohen Komplexität sowie der großen Varianz der möglichen Auslegung zusammen. Beispielsweise steigert eine hohe Ausfallsicherheit durch Redundanz von Komponenten wie Verdichter und Dispenser als auch eine größere vor Ort vorgehaltene Wasserstoffmenge als Betriebsreserve die Kosten deutlich. Darüber hinaus hat die Auslegung der Betankungskapazität, also wieviel Fahrzeuge ohne technisch bedingte Pause nacheinander betankt werden können, entscheidenden Einfluss auf die Kosten der Wasserstofftankstelle.

Als möglicher Ansatzpunkt wird die Datengrundlage aus 3.2.4 herangezogen, denn insgesamt 10 der 14 geplanten Projekte sind mit einer Kostenangabe versehen. Demnach **werden im Schnitt pro Tankstelle 2,6 Mio. €** angesetzt. Die Preisspanne reicht von 1 Mio. € bis hin zu 5 Mio. € als Maximalwert.

Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

**Förderbedarf**

Aus dem Abschnitt 3.2.3 geht der aktuelle Bestand an Dieseltankstellen mit 51 Stück hervor. Weiterhin sind bereits 4 Wasserstofftankstellen aufgeführt, zu denen gedanklich die 14 geplanten Projekte hinzuaddiert werden. Als Differenz bleiben demnach **33 Wasserstofftankstellen**, um zahlenmäßig mit dem Dieselbestand gleichzuziehen. Diese werden mit den abgeleiteten 2,6 Mio. € pro Tankstelle multipliziert.

**Förderquote 80 %** (Bezug: 3. Entwurf EFRE-Richtlinie Mobilität II 2021-2027)

| Technologie            | Wasserstoff |             |
|------------------------|-------------|-------------|
|                        | Zeitraum    |             |
|                        | bis 2025    | 2026 - 2030 |
| Förderbedarf in Mio. € | 68,6        |             |

Tabelle 12: Förderbedarf der Tankinfrastruktur

**3.6.3 Werkstätten, Betriebsstätten und Betriebshöfe**

Im Schnitt sind die bestehenden Werkstätten, Betriebsstätten und Betriebshöfe bei den Brandenburger VU rund **23 Jahre** alt. Wird von einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 25 Jahren bei Infrastrukturobjekten ausgegangen, ist eine umfassende Sanierung oder Erneuerung innerhalb der nächsten Jahre für einen Großteil der VU obligatorisch.

Aus dem Absatz 3.2.4 gehen 11 Projekte mit passendem Hintergrund hervor, wobei 9 eine Kostenschätzung von in Summe 120 Mio. € beinhalten. Daraus ergibt sich ein durchschnittlicher Investitionsbedarf von etwa 13,3 Mio. € pro Projekt. Diese Summe ist exklusive der Kosten für den ggf. notwendigen Erwerb eines Grundstücks. Auch mögliche Erschließungskosten kämen hinzu.

**Investitionsbedarf**

Von den 47 Betriebshöfen sind 4 innerhalb der letzten 5 Jahre saniert oder neugebaut worden. Die Überlegung zum Investitionsbedarf unterstellt diesen Höfen keinen akuten Handlungsbedarf. Weiterhin sind 11 Projekte in der Planung.

Zusammengefasst bleiben 32 Objekte, die turnusmäßig überarbeitet oder erneuert werden müssten und im Zusammenhang für die Einführung von alternativen Antrieben sowie die Erfüllung aktueller Anforderungen zu ertüchtigen sind.



## Aggregation zum aktuellen Stand im Land Brandenburg

| Technologie                  | Technologieoffen |             |
|------------------------------|------------------|-------------|
| Zeitraum                     | bis 2025         | 2026 - 2030 |
| Investitionsbedarf in Mio. € | 426,6            |             |

Tabelle 13: Investitionsbedarf der Werkstätten, Betriebsstätten und Betriebshöfe

Der hier dargestellte Finanzierungsbedarf übersteigt deutlich die im Rahmen der geplanten Europäischen-Fonds-für-regionale-Entwicklungs-Richtlinie (EFRE) Mobilität II zur Verfügung stehenden Fördermittel in Höhe von 67,8 Mio. €. Auch die bisher von der Bundesregierung zur Verfügung gestellten Finanzierungsinstrumente wie der Deutsche Aufbau- und Resilienzplan (DARP) können diesen Bedarf hinsichtlich der Förderbedingungen nur zu einem geringen Umfang absichern.

#### 3.6.4 Planungszeithorizonte: Infrastruktur vs. Fahrzeug

Der zeitliche Rahmen für die reine Fahrzeugbeschaffung beläuft sich insgesamt auf etwa anderthalb Jahre. Darin enthalten sind die Dauern für eine öffentliche Ausschreibung mit entsprechenden Fristen, die Fahrzeuglieferung sowie die abschließende Inbetriebnahme.

Für Infrastrukturprojekte ergeben sich größere zeitliche Umfänge. Sie resultieren aus der Dauer der (Vor-)Planung, Beschaffung inkl. Ausschreibung sowie der Errichtung mit den eigentlichen Baumaßnahmen. Für die Errichtung von Lade- oder Tankinfrastruktur sollten mindestens 2 Jahre eingeplant werden. Der Zeitbedarf für einen Betriebshofneu- oder umbau, entweder in einem oder in mehreren Bauabschnitten, liegt deutlich darüber.

Ohne die passende Infrastruktur lassen sich die alternativ angetriebenen Busse nicht einsetzen. Dementsprechend muss vor allem zu Beginn der technologischen Umstellung der Fokus auf der systematischen Planung und Beschaffung liegen, damit in der Beschaffung befindliche Fahrzeuge entsprechend rechtzeitig versorgt werden können.

Die Planungshorizonte verschieben sich allerdings auch dann, wenn für Projekte zunächst Fördermittel eingeworben werden müssen, das Vorliegen des Förderbescheides, sofern kein vorzeitiger Maßnahmenbeginn gesondert beantragt wurde, abgewartet werden muss und Förderbescheide ggf. unerwartet negativ ausfallen. Beispielsweise war die Elektrobüsforderung auf Bundesebene (zweistufiges Verfahren) überzeichnet und viele VU wurden nicht mit ihren Anliegen bedacht. Die Bewertungskriterien zielten unter anderem auf ein möglichst hohes Vermeidungspotenzial von Luftschadstoffemissionen im Verhältnis zur eingesetzten Fördersumme. Dabei haben Anträge mit fahrzeug- und laufleistungsintensiven Inhalten Vorteile. Diese sind eher im verdichteten Stadtverkehr größerer Kommunen oder Städte anzutreffen, als im ländlichen Gebiet.

## Zusammenfassung und Ausblick

### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Bericht stellt den derzeitigen und für die nächsten Jahre abzuschätzenden Umsetzungsstand der CVD im ÖPNV des Landes Brandenburg dar. Dieser geht mit der Umstellung von vornehmlich Dieselbus-geprägten Busflotten einher und ist verbunden mit Änderungen am über viele Jahre hin optimierten Busbetrieb.

Für einen konkreten Einblick in die Umfänge im Land Brandenburg wurde eine repräsentative Anzahl von Verkehrsunternehmen und Aufgabenträgern, die mindestens 80 % der Fläche Brandenburgs abdecken, befragt. Daraus stehen direkt übermittelte Informationen von 13 der insgesamt 16 einbezogenen Teilnehmer bereit. Es sind sowohl Aussagen zu den Fahrzeugen (aktueller Bestand, geplante Ausmusterung, geplante Beschaffung) als auch Angaben zur Infrastruktur (ebenfalls aktueller Bestand und geplante Vorhaben) enthalten.

Anhand der bisher eingesetzten alternativ angetriebenen Fahrzeuge lässt sich für das Bundesland noch keine klare Tendenz hinsichtlich der Wahl der Antriebstechnologie ableiten. Allerdings zeigt die Verteilung von 6 geplanten Ladeinfrastrukturprojekten zu 14 geplanten Wasserstoff-Tankinfrastrukturprojekten in Richtung der Wasserstofftechnologie. Dabei ist auffällig, dass eine große Disparität zwischen den verschiedenen Landkreisen bezüglich der aktuell bereits in Angriff genommenen konkreten Umsetzungsprojekte als auch deren Volumina herrscht. Ein Landkreis nimmt beim Umstieg eine eindeutige Vorreiterrolle ein.

Wenn die Fahrzeugbeschaffung so stattfindet, wie sie in der Datenerhebung der 13 VU gemeldet wurde, dann wird von diesen repräsentativen Vertretern nach aktuellem Stand die CVD-Quotenvorgabe für Beschaffungen von ÖPNV-Bussen auf Landesebene in beiden Referenzzeiträumen sehr wahrscheinlich erfüllt. Für den ersten Zeitraum liegt der Anteil sauberer Fahrzeuge bei 50 % und der Anteil emissionsfreier Fahrzeuge bei 35 %. Im zweiten Referenzzeitraum werden keine sauberen Fahrzeuge beschafft und der Anteil emissionsfreier Fahrzeuge liegt bei 86 %. Für die Anfangsjahre des ersten Referenzzeitraumes sind folgende Beschaffungsmeldungen (sauber/emissionsfrei) zu erwarten: 2021 0/1, 2022 6/10 sowie 2023 11/5.

Welcher Förderbedarf fahrzeugseitig zu erwarten ist, lässt sich durch die Angabe der Fahrzeugaussonderung nach Jahresscheiben verhältnismäßig gut abschätzen. Er beläuft sich bis zum Ende des zweiten Referenzzeitraums auf etwa 110-115 Mio. € und ist abhängig von der gewählten Fahrzeugtechnologie. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass durch eine Angebotserweiterung in Folge des Klimaschutzgesetzes der Bundesregierung von einer gesteigerten Anzahl und damit noch höheren Förderbedarfen auf der Fahrzeugseite auszugehen ist.

Auf der Infrastrukturseite lässt sich aufzeigen, dass die vorhandenen Betriebshöfe und Werkstätten im Durchschnitt über 20 Jahre alt sind und dementsprechend viele Objekte

---

## Zusammenfassung und Ausblick

erneuert, eingehend saniert oder durch Neubauten ersetzt werden müssten. Der geschätzte Investitionsbedarf für diese umfassenden Maßnahmen liegt bei etwa 427 Mio. €.

Hinzu kommen Investitionsbedarfe für die Tank- und oder Ladeinfrastruktur. Ihr Bedarf lässt sich nur schwer abschätzen, weil er zum einen von der Technologieauswahl und der konkreten Auslegung des jeweiligen Systems abhängig ist und zum anderen von den individuellen Eigenschaften bestehender Liegenschaften beeinflusst wird. Überschläglich liegt der Fördermittelbedarf nach dem Entwurf der EFRE-Richtlinie Mobilität II für die Ladeinfrastruktur bei 32 Mio. € unter der Annahme, dass alle neu zu beschaffenden Busse Elektrobusse sind und jedes Fahrzeug einen Ladepunkt im Depot bekommt plus zusätzlich 30 % über Streckenladepunkte versorgt werden. Sollten dagegen alle Fahrzeuge auf der Brennstoffzellentechnologie basieren, liegt der geschätzte Förderbedarf mit 69 Mio. € für die Tankinfrastruktur etwa doppelt so hoch.

Subsummierend liegt der Investitionsbedarf innerhalb der beiden Referenzzeiträume im Land Brandenburg für ÖPNV-Fahrzeuge und zugehöriger Infrastruktur bei rund 660 Mio. €. Hinzu kommen Bedarfe der 3 Verkehrsunternehmen, die nicht an der Datenabfrage teilgenommen haben. Diese notwendigen Investitionsmittel werden durch die vorhandenen und bisher vorgesehenen Finanzierungsinstrumente von Bund und Land nur teilweise gedeckt. Insbesondere der hohe Investitionsbedarf für die Sanierung und Erneuerung der vorhandenen Betriebshöfe stellt eine finanzielle Herausforderung für die Aufgabenträger und Unternehmen des kommunalen ÖPNV dar, der finanzpolitisch gelöst werden muss.

Bei der Auswahl der Technologie sollte neben den Investitionskosten für die Fahrzeuge sowie die Infrastruktur auch die zwischen den Technologien stark differierenden Betriebskosten mit einbezogen werden. Sie setzen sich aus den Energie- sowie den Wartungskosten der Infrastruktur zusammen. Nach aktuellem Stand fallen diese Kosten beim Elektrobus niedriger als beim Brennstoffzellenbus aus.

Generell ist es ratsam, den Brandenburger ÖPNV-Busverkehr an zwei Stellen besonders zu unterstützen. Einerseits bei Verkehrsunternehmen, die noch ganz am Anfang stehen. Diese sollten durch eine detaillierte Betrachtung ihrer Randbedingungen in Form einer technologieoffenen Machbarkeitsstudie zu einem tragfähigen Umsetzungskonzept gelangen und anschließend in die Umsetzung starten. Andererseits sollten auch Verkehrsunternehmen bedacht werden, die bereits vorangeschritten sind, denen konkrete Planungen vorliegen oder die sich bereits in der Umsetzungsphase befinden.

---

Anlagen

## **Anlagen**

- 1) Datenabfrage
- 2) Fahrzeugbeschaffungen für das Jahr 2021 ff.

## Anlage 1 – Datenabfrage

| Lfd Nr | Bezugsjahr |  | Fahrzeugflotte         |                     |             |         |                   |                     |             |          |           |          | Ersatzbeschaffung       |          |                         |                      |      |                       |             |          |             |          |
|--------|------------|--|------------------------|---------------------|-------------|---------|-------------------|---------------------|-------------|----------|-----------|----------|-------------------------|----------|-------------------------|----------------------|------|-----------------------|-------------|----------|-------------|----------|
|        | 2022       |  | Interne Fahrzeugnummer | Hersteller & Modell | Fahrzeugtyp | Baujahr | Zulassung beim VU | Einsatzzeit beim VU | Antriebsart | Dropdown | EURO Norm | Dropdown | Kraftstoffsorte Antrieb | Dropdown | Kraftstoffsorte Heizung | Ersatz vorgesehen in | Jahr | Zuschlagserteilung in | Fahrzeugtyp | Dropdown | Antriebsart | Dropdown |
| 1      |            |  | 862                    | EVOLBUS O 530       | SB          | 2008    | 04.09.2008        | 14                  | Diesel      | V-EEV    | SD        | HS       | 2021                    | 2020     | SB                      | Diesel               | VI   |                       |             |          |             |          |
| 2      |            |  | 863                    | EVOLBUS O 530       | SB          | 2008    | 01.12.2008        | 14                  | Diesel      | V-EEV    | SD        | HS       | 2021                    | 2020     | SB                      | Diesel               | VI   |                       |             |          |             |          |
| 3      |            |  | 1436                   | Citaro O 530 C2     | SB          | 2014    | 23.10.2014        | 8                   | Diesel      | VI       | SD        | HS       | 2022                    | 2020     | SB                      | Diesel               | VI   |                       |             |          |             |          |
| 4      |            |  | 1436                   | Citaro O 530 C2     | SB          | 2014    | 21.10.2014        | 8                   | Diesel      | VI       | SD        | HS       | 2022                    | 2020     | SB                      | Diesel               | VI   |                       |             |          |             |          |
| 5      |            |  | 1437                   | Citaro O 530 C2     | SB          | 2014    | 21.10.2014        | 8                   | Diesel      | VI       | SD        | HS       | 2022                    | 2020     | SB                      | Diesel               | VI   |                       |             |          |             |          |
| 6      |            |  | 1610                   | Citaro O 530 C2     | SB          | 2016    | 04.01.2016        | 6                   | Diesel      | VI       | SD        | HS       | 2027                    | 2025     | SB                      | BE-Bus               |      |                       |             |          |             |          |
| 7      |            |  | 1611                   | Citaro O 530 C2     | SB          | 2016    | 04.01.2016        | 6                   | Diesel      | VI       | SD        | HS       | 2027                    | 2025     | SB                      | BE-Bus               |      |                       |             |          |             |          |
| 8      |            |  | 1612                   | Citaro 628 C2       | SB          | 2016    | 01.12.2016        | 6                   | Diesel      | VI       | SD        | HS       | 2027                    | 2025     | SB                      | BE-Bus               |      |                       |             |          |             |          |
| 9      |            |  | 1613                   | Citaro 628 C2       | SB          | 2016    | 01.12.2016        | 6                   | Diesel      | VI       | SD        | HS       | 2027                    | 2025     | SB                      | BE-Bus               |      |                       |             |          |             |          |
| 10     |            |  | Zweiersatz             |                     |             | 0       |                   | 0                   | Diesel      |          |           |          | 2033                    | 2031     | SB                      | BE-Bus               |      |                       |             |          |             |          |
| 12     |            |  | Zweiersatz             |                     |             | 0       |                   | 0                   | Diesel      |          |           |          | 2033                    | 2031     | SB                      | BE-Bus               |      |                       |             |          |             |          |
| 13     |            |  | Zweiersatz             |                     |             | 0       |                   | 0                   | Diesel      |          |           |          | 2033                    | 2031     | SB                      | BE-Bus               |      |                       |             |          |             |          |
| 14     |            |  | Zweiersatz             |                     |             | 0       |                   | 0                   | Diesel      |          |           |          | 2033                    | 2031     | SB                      | BE-Bus               |      |                       |             |          |             |          |
| 15     |            |  | Zweiersatz             |                     |             | 0       |                   | 0                   | Diesel      |          |           |          | 2034                    | 2031     | SB                      | BE-Bus               |      |                       |             |          |             |          |

Abbildung 0.1: Datenabfrage, Beispiel für Fahrzeugflotte Bestand und Ersatzbeschaffung

Anlagen

| Fahrzeugtyp  | Abkürzung        | Länge in Metern  | Einordnung nach CVD                      |                            |
|--|------------------|--|--|----------------------------|
| Minibus  | MN               | 6,0 - 8,0  | Konventionelle Fahrzeuge                 |                            |
| Midibus  | MD               | 8,0 - 10,0   |  |                            |
| Standardbus  | SB               | 10,0 - 13,5  |  |                            |
| 3-Achs Standardbus   | SB-3             | 13,5 - 15,0  |  |                            |
| Gelenkbus  | GB               | 18,0 - 18,75   |  |                            |
| 4-Achs Gelenkbus   | GB-4             | 19,0 - 21,0  |  |                            |
| Doppelgelenkbus  | GB-D             | 21,0 - 24,8  |  |                            |
| Buszug   | BZ               | 21,0 - 25,7  |  |                            |
| <b>Antriebsart</b>   | <b>Abkürzung</b> | <b>Busbezeichnung</b>  |  | <b>Einordnung nach CVD</b> |
| Dieselantrieb  | Diesel           | Dieselbus konventionell  |  | Konventionelle Fahrzeuge   |
| Hybridantrieb  | Hybrid           | Diesel-/Erdgas-Hybridbus ohne Nachladung von Außen                             |  |                            |
| Plug-In-Hybridantrieb  | Plug-In-Hybrid   | Diesel-/Erdgas-Hybridbus mit Nachladung von Außen                              |  |                            |
| Hybrid-Oberleitungsbus   | HO-Bus           | Oberleitungsbus mit partieller Oberleitung und Verbrennungsmotor               |  |                            |
| Verbrennungsantrieb Biokraftstoffe                             | Biodiesel        | Dieselbus mit Nutzung von Biokraftstoffen                                      |  |                            |
| Verbrennungsantrieb synthetische / paraffinhaltige Kraftstoffe | Syndiesel        | Dieselbus mit Nutzung von synthetischen / paraffinhaltigen Kraftstoffen        |  |                            |
| Verbrennungsantrieb Gas  | Gas              | Gasbus mit Nutzung von Erdgas / Biomethan, gasförmig (CNG) und flüssig (LNG)   |  |                            |
| Batterieelektrischer Antrieb                                   | BE-Bus           | Batteriebus  | Saubere Fahrzeuge (Exkl. Emissionsfreie) |                            |
| Batterieelektrischer Antrieb Oberleitung                       | O-Bus            | Batterie-Oberleitungsbus   |  |                            |
| Brennstoffzellen-Antrieb                                       | BZ-Bus           | Brennstoffzellenbus  |  |                            |
| Brennstoffzellen-Ränge-Extender-Antrieb                        | BZ-Rex-Bus       | Brennstoffzellenbus mit Range Extender   |  |                            |
| Verbrennungsantrieb Wasserstoff                                | H2-Bus           | Wasserstoff-Verbrenner   | Emissionsfreie Fahrzeuge                 |                            |
| <b>Kraftstoffsorte</b>   | <b>Abkürzung</b> | <b>Erläuterung</b>   |  |                            |
| Standard Diesel  | SD               | mit Beimischung von max. 7 % Biodiesel   |  |                            |
| Premium Diesel   | PD               | mit GTL-Beimischung, Additiven und erhöhter Cetanzahl                          |  |                            |
| Biodiesel  | BD               | aus Biomasse, neben Biodiesel auch Pflanzenöle und hydrierte Pflanzenöle (HVO) |  |                            |
| Synthetischer Diesel   | GTL              | aus Gas-to-Liquids-Technik (Erdgas), auch Biomass-to-Liquids-Technik (Biolgas) |  |                            |
| Compressed Natural Gas   | CNG / Bio-CNG    | gasförmiges Erdgas / Biomethan   |  |                            |
| Liquidified Natural Gas  | LNG / Bio-LNG    | flüssiges Erdgas / Biomethan   |  |                            |
| Wasserstoff  | H2               | grüner Wasserstoff   |  |                            |
| Strom  | Strom            | grüner Strom   |  |                            |
| Heizöl Standard  | HS               | Schwefelanteil bis 1000 mg/kg  |  |                            |
| Heizöl Extraleicht   | HE               | Schwefelanteil bis 50 mg/kg  |  |                            |

Abbildung 0.2: Datenabfrage, Erklärung für Dropdown-Felder

| Bezugsjahr  |                       | 2022    |                            |                        |                            |                              |   |
|-------------|-----------------------|---------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------------|---|
| Betriebshof |                       |         |                            | Infrastruktur          |                            |                              |   |
| Lfd.Nr      | Betriebshof           | Baujahr | Jahr der letzten Sanierung | Abstellkapazität Offen | Abstellkapazität Überdacht | Abstellkapazität Geschlossen | Werkstattkapazität (Stellplätze für Instandhaltung) |
|             | Freitext              | Jahr    | Jahr                       | Anzahl                 | Anzahl                     | Anzahl                       | Anzahl  |
| BSP         | Depot Dresdner Straße | 1995    | 2005                       | 0                      | 0                          | 50                           | 6   |
| BSP         | Depot Berliner Straße | 2000    | 2010                       | 10                     | 10                         | 0                            | 2   |
| 1           |                       |         |                            |                        |                            |                              |   |
| 2           |                       |         |                            |                        |                            |                              |   |

Abbildung 0.3: Datenabfrage, Beispiel für Infrastruktur Betriebshof

| Geplante oder im Bau befindliche Infrastruktur |                       |                                  |                     |                                 |              |
|--|-----------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------------------|--------------|
| Lfd.Nr   | Betriebshof           | Art der Infrastruktureinrichtung | Geplanter Baubeginn | Geschätztes Investitionsvolumen | Beschreibung |
|  | Freitext              | Freitext                         | Jahr                | EUR                             | Freitext     |
| BSP 1  | Depot Dresdner Straße | Tankstelle                       | 2022                | 200.000 €                       |              |
| BSP 2  | Neuer Betriebshof     | Abstellhalle (geschlossen)       | 2025                | 100.000 €                       |              |
| BSP 3  | Neuer Betriebshof     | Abstellhalle (offen)             | 2022                | 50.000 €                        |              |
| 1  |                       |                                  |                     |                                 |              |
| 2  |                       |                                  |                     |                                 |              |

Abbildung 0.4: Datenabfrage, Beispiel für geplante Infrastruktur

Anlagen

## Anlage 2 – Geplante Fahrzeugbeschaffungen für das Jahr 2021 ff.

|                | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 | 2025 |
|----------------|------|------|------|------|------|
| Diesel         | 9    | 31   | 22   | 15   | 2    |
| Hybrid         | 0    | 6    | 4    | 2    | 1    |
| Plug-In-Hybrid | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| HO-Bus         | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Biodiesel      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Syndiesel      | 0    | 6    | 11   | 9    | 2    |
| Gas            | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| BE-Bus         | 0    | 0    | 0    | 13   | 19   |
| O-Bus          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| BZ-Bus         | 0    | 0    | 4    | 2    | 7    |
| BZ-Rex-Bus     | 0    | 3    | 0    | 0    | 0    |
| H2-Bus         | 1    | 7    | 1    | 0    | 8    |
| M3 Kl. II      | 4    | 19   | 18   | 11   | 10   |

Tabelle 0.1: Fahrzeugbeschaffung im 1. Referenzzeitraum



|                | 2026 | 2027 | 2028 | 2029 | 2030 |
|----------------|------|------|------|------|------|
| Diesel         | 0    | 6    | 0    | 0    | 0    |
| Hybrid         | 2    | 2    | 2    | 1    | 1    |
| Plug-In-Hybrid | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| HO-Bus         | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Biodiesel      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Syndiesel      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Gas            | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| BE-Bus         | 14   | 9    | 26   | 2    | 7    |
| O-Bus          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| BZ-Bus         | 4    | 6    | 12   | 1    | 0    |
| BZ-Rex-Bus     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| H2-Bus         | 0    | 0    | 0    | 3    | 3    |
| M3 Kl. II      | 11   | 0    | 16   | 12   | 15   |

Tabelle 0.2: Fahrzeugbeschaffung im 2. Referenzzeitraum

## Anlagen

|                | 2031 | 2032 | 2033 | 2034 | 2035 | 2036 | 2037 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Diesel         | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Hybrid         | 0    | 3    | 8    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Plug-In-Hybrid | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| HO-Bus         | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Biodiesel      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Syndiesel      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Gas            | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| BE-Bus         | 9    | 0    | 0    | 10   | 0    | 0    | 0    |
| O-Bus          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| BZ-Bus         | 4    | 6    | 0    | 0    | 0    | 2    | 0    |
| BZ-Rex-Bus     | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| H2-Bus         | 5    | 6    | 3    | 1    | 0    | 0    | 0    |
| M3 Kl. II      | 13   | 23   | 13   | 31   | 9    | 13   | 5    |

Tabelle 0.3: Fahrzeugbeschaffung nach dem 2. Referenzzeitraum