

Elektrifizierungsstrategie für die Busflotte im Stadtgebiet Potsdam



Auftraggeberin:
Landeshauptstadt Potsdam



Partner:
Verkehrsbetrieb Stadtwerke Potsdam



Verkehrsbetrieb
Stadtwerke
Potsdam

Elektrifizierungsstrategie für die Busflotte im Stadtgebiet Potsdam

Gefördert durch:

Investitionsbank des Landes Brandenburg

Investitionsbank
des Landes
Brandenburg **ILB**

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Energie



Europäischer Fonds für regionale Entwicklung in Brandenburg



EUROPÄISCHE UNION
Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung

efre.brandenburg.de

Autor*innen:

Reiner Lemoine Institut gGmbH

Jakob Gemassmer

Julian Brendel

Norman Pieniak

EMCEL GmbH

Marcel Corneille

Marius Schneider

30. April 2022

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
1. Einführung und Problemstellung.....	8
2. Elektrifizierungsstrategie für den Busverkehr in Potsdam	9
2.1 Alternativen für den Busverkehr im Überblick	9
2.2 Analyse und Bewertung der Umläufe	13
2.3 Ladestandorte für Gelegenheitsladung	17
2.4 Beschaffungsstrategie für Busse und Infrastruktur	18
2.5 Wirtschaftliche Gesamtbetrachtung.....	23
3. Der elektrifizierte Betriebshof.....	25
3.1 Energetische Betrachtung am Betriebshof.....	25
3.2 Ladeinfrastruktur im Betriebshof.....	27
3.3 Anpassungsbedarf für Personal und Werkstatt	30
3.4 Energiekosten im Betriebshof	32
4. Laden auf der Strecke	33
4.1 Energetische Betrachtung der elektrifizierten Haltestellen.....	33
4.2 Ladeinfrastruktur an den elektrifizierten Haltestellen	33
4.3 Kosten der Ladestandorte	36
5. Ausblick auf Busvorlauf Krampnitz	37
6. Quellen.....	38
7. Anhang	40

Zusammenfassung

Die Landeshauptstadt Potsdam hat sich zu 100 % Klimaschutz verpflichtet und steht damit auch im ÖPNV vor der Herausforderung alternative Antriebskonzepte einzuführen. Daher wurde eine Strategie für alternative Antriebe erarbeitet, um den Anforderungen aus der Clean Vehicles Directive (CVD) der Europäischen Union bestmöglich begegnen zu können. Die CVD legt fest, dass für den ersten Zeitraum bis Ende 2025 insgesamt 45 % der neu beschafften Busse sauber sein müssen, für den zweiten Zeitraum bis Ende 2030 liegt dieser Wert bei 65 %. Von diesen sauberen Bussen müssen jeweils 50 % Null-Emissions-Busse, also lokal emissionsfreie Fahrzeuge sein.

Die vorliegende Elektrifizierungsstrategie für die Busflotte der Verkehrsbetriebe Potsdam (ViP) weist den Weg zu einem nachhaltigen elektrifizierten Busbetrieb. Die Studie zeigt Optionen und die damit verbundenen Kosten für eine Elektrifizierung der Busflotte der ViP auf. Dabei wurden die folgenden alternativen Antriebstechnologien näher untersucht:

- Batteriebusse mit Depotladung und Gelegenheitsladung
- Brennstoffzellenbusse
- Hybrid-Oberleitungsbusse

Im Ergebnis wird der Einsatz von Bussen mit batterieelektrischem Antrieb zur Umsetzung empfohlen. Diese Technik ist sowohl serienreif als auch die kostengünstigste. Der Preis pro gefahrenem Kilometer bei einem Batteriebus beträgt 1,62 €. Für Dieselbusse sind dies 1,50 €, für Brennstoffzellenbusse 2,01 € sowie für Hybrid-Oberleitungsbusse 3,58 €. Dabei sind keine Personalkosten und Abschreibungen berücksichtigt. Es wurde auch der Einsatz von Bussen mit synthetischen Kraftstoffen und Gas-to-Liquid mitgedacht. Allerdings wurden diese technischen Möglichkeiten aufgrund der Anforderungen aus der CVD nicht weiterverfolgt. Der Einsatz von mehreren alternativen Antriebstechnologien ist bei einem Unternehmen von der Größe der ViP nicht wirtschaftlich und betriebswirtschaftlich sinnvoll.

Basierend auf den aktuellen Fahrplänen können etwa 70 % der Busflotte batterieelektrisch bedient werden. Durch eine Anpassung der Umläufe und Akzeptanz eines betrieblichen Mehraufwandes kann diese Quote auf 86 % gesteigert werden. Bei einer Umsetzung der Clean Vehicles Directive müssten zwischen 2023-2025 insgesamt 11 Busse von 23 Bussen mit batterieelektrischem Antrieb und zwischen 2026-2030 insgesamt 23 Busse von 34 Bussen mit batterieelektrischem Antrieb beschafft werden. Neben den gesetzlichen Vorgaben aus der CVD wird für einen zukunftsorientierten Betrieb die ausschließliche Beschaffung elektrischer Busse ab dem Jahr 2030 empfohlen. Geeignete Markt- und Förderbedingungen können eine Beschaffung rein elektrischer Busse unter Umständen begünstigen.

Die übergeordnete Strategie zur Umsetzung der CVD innerhalb des laufenden ÖDA sieht eine Unterteilung in drei Phasen vor:

- Pilotphase: 2023-2025
- Anlaufphase: 2026-2030
- Ausbauphase: Ab 2031

Diese Strategie sichert die Einhaltung der CVD-Vorgaben und in der Pilot- und Anlaufphase können Erfahrungen mit den neuen Technologien gesammelt werden, um sich für die Ausbauphase besser aufzustellen und bietet zudem die Möglichkeit, auf eine sich ändernde Marktlage zu reagieren.

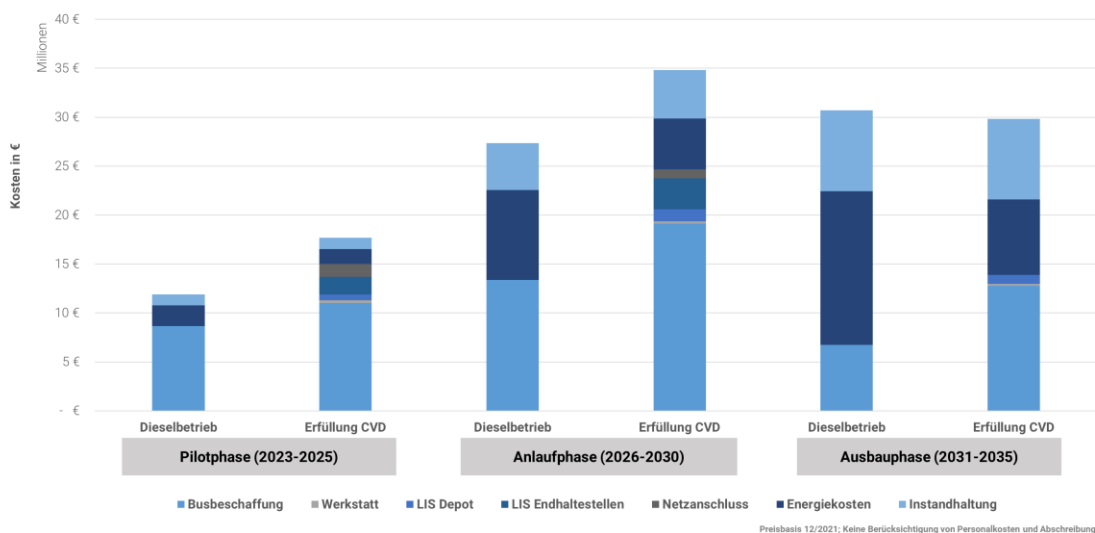


Abbildung 1: Investitions- und Energiekosten in den Phasen der Elektrifizierungsstrategie

Ohne Berücksichtigung von Personalkosten und Abschreibungen kann im Zuge der Elektrifizierung in der Pilotphase (2023-2025) mit Mehrkosten von etwa 5,78 Mio. € bei einer Umsetzung der CVD im Vergleich zum Weiterbetrieb mit Dieselnissen gerechnet werden. Für die Anlaufphase in den Jahren 2026-2030 belaufen sich diese Mehrkosten auf ca. 7,47 Mio. €. In der Ausbauphase ergeben sich bis zum Jahr 2035 aufgrund der geringeren Betriebskosten Kostenersparnisse von ca. 0,88 Mio. €. Investitionskosten für die Infrastruktur setzen sich aus der Ladeinfrastruktur auf den Strecken und im Betriebshof, den Werkstattanpassungen sowie den Netzanschlusskosten zusammen. Zudem ist für die Batteriebusse ein Batterietausch nach 7 Jahren zu berücksichtigen. Die Investitionskosten belaufen sich in der Pilotphase auf ca. 15,00 Mio. €, in der Anlaufphase auf ca. 24,68 Mio. € und in der Ausbauphase auf ca. 13,88 Mio. €.

Abkürzungsverzeichnis

BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CVD	Clean Vehicle Directive
DL	Depotlader
EU	Europäische Union
EWP	Energie- und Wasser Potsdam GmbH
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug
GB	Gelenkbus
GL	Gelegenheitslader
HV	Hochvolt
HPC	High Power Charging
LIS	Ladeinfrastruktur
LP	Ladepunkt
NGP	Netzgesellschaft Potsdam GmbH
NPM	Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität
OH-Bus	Oberleitungshybridbus
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
POI	Ort des öffentlichen Interesses (Point of Interest)
RLM	Registrierende Leistungsmessung
SB	Solobus
ViP	Verkehrsbetrieb Potsdam GmbH
W&I	Wartung und Instandhaltung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Investitions- und Energiekosten in den Phasen der Elektrifizierungsstrategie	4
Abbildung 2: Quoten der Clean Vehicles Directive	8
Abbildung 3: Länge der Umläufe des aktuellen Busbetriebs.....	9
Abbildung 4: Vergleich der Kilometerkosten für verschiedene Bustechnologien	13
Abbildung 5: Energieverbrauch je Umlauf im Sommer und Winter	14
Abbildung 6: Aufteilung der Busflotte in Depotlader, Gelegenheitslader sowie nicht batterieelektrisch bedienbare Umläufe nach einer Umlaufanpassung.....	15
Abbildung 7: Elektrifizierte Endhaltestellen im Stadtgebiet Potsdam	18
Abbildung 8: Technologieunabhängiger Busbeschaffungsplan der ViP.....	18
Abbildung 9: Übergeordnete Elektrifizierungsstrategie.....	19
Abbildung 10: Kumulierte Investitionskosten für den Weiterbetrieb mit Dieselnissen sowie die Erfüllung der CVD-Mindestvorgaben bis 2035	21
Abbildung 11: Roadmap der Elektrifizierungsstrategie bis 2025	21
Abbildung 12: Lastprofile der unterschiedlichen Ladeszenarien am Betriebshof Fritz-Zubeil-Straße für Mittwoch bis Sonntag.....	26
Abbildung 13: Verteilung der Standzeiten der Busse im Depot (Mittwoch)	27
Abbildung 14: Integrationsmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur am Betriebshof [14, 16]...	29
Abbildung 15: Anpassungsbedarf der Werkstatt für Hochvolt-Technologie	31
Abbildung 16: Lastprofil an der Endhaltestelle S Hauptbahnhof mit drei möglichen Pantographen.....	33
Abbildung 17: Schematischer Aufbau einer Ladestation [12].....	34
Abbildung 18: LIS am Hauptbahnhof	35
Abbildung 19: Innenstadtbereich Potsdam.....	43
Abbildung 20: Methodik der Umlaufanpassung	49
Abbildung 21: Grundriss und Außenansicht einer begehbaren Trafostation [33].....	56
Abbildung 22: Schulungsbedarf für Arbeiten am HV-System.....	57
Abbildung 23: Verfahrensschema H ₂ -Tankstelle mit Trailerbelieferung und Elektrolyse	58
Abbildung 24: Anpassungsbedarf der Werkstatt für Hochvolt- und H ₂ -Technologie.....	60
Abbildung 25: Schulungsbedarf für Arbeiten am H ₂ -System.....	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eingesetzte Batteriekapazitäten für Depot- und Gelegenheitslader (entsprechend eigener Marktanalyse der ViP)	14
Tabelle 2: Kilometerkosten der einzelnen Linien. Für unter den getroffenen Annahmen nicht elektrisch bedienbaren Umläufen (n.e.) wird eine Mischkalkulation aus Depot- und Gelegenheitsladern genutzt.....	16
Tabelle 3: Auswahl Endhaltestellen, die elektrifiziert werden können. Die Angaben zu Wartezeiten und Fahrten beziehen sich auf eine Woche.....	17
Tabelle 4: Aufteilung der Bustechnologien auf Solo- und Gelenkbusse bis 2030	19
Tabelle 5: Beschaffungsplan mit E-Bussen bis 2030 zur Erfüllung der CVD-Mindestvorgaben	20
Tabelle 6: Gesamtkostenbetrachtung ggü. Weiterbetrieb mit Dieselnissen.....	23
Tabelle 7: Investitionskosten ggü. Weiterbetrieb mit Dieselnissen	24
Tabelle 8: Energie- und Instandhaltungskosten ggü. Weiterbetrieb mit Dieselnissen	24
Tabelle 9: Strombedarf je Wochentag im Depot.....	25
Tabelle 10: Definition und Lastspitzen der Ladeszenarien am Betriebshof	25
Tabelle 11: Bedarf und Fixkosten der Ladeinfrastruktur im Depot	28
Tabelle 12: Kostenschätzung Werkstatertüchtigung	31
Tabelle 13: Energetische Kennzahlen und Stromkosten am Betriebshof für 49 Busse.....	32
Tabelle 14: Übersicht über die zur Ladung der Busse zu errichtenden Bauwerke	34
Tabelle 15: Übersicht der Endhaltestellen mit Ladeinfrastruktur	35
Tabelle 16: Kosten für die Errichtung der Ladeinfrastruktur an den ausgewählten Endhaltestellen.....	36
Tabelle 17: Energiebezugskosten an den ausgewählten Endhaltestellen	37
Tabelle 18: Vor- und Nachteile verschiedener Pantographen (Bildquelle: [27])	42
Tabelle 19: Verkehrsfluss zu Stoßzeiten	43
Tabelle 20: Angenommene Batteriekapazitäten.....	44
Tabelle 21: Beeinträchtigung der Ladezeiten an Endhaltestellen.....	44
Tabelle 22: Energieverbrauch pro 100 km	45
Tabelle 23: Nebenverbrauch Heizung während der Fahrt in kWh/km (Abgeleitet von [13])	46
Tabelle 24: Eigenschaften aller Endhaltestellen - Wartezeiten, Potenzial für mögliche Pantographen sowie Einschätzung der operativen Eignung.....	48
Tabelle 25: Kosten für Bustechnologien	50
Tabelle 26: Energie- und Instandhaltungskosten einzelner Bustypen.....	51
Tabelle 27: Auslegung der H ₂ -Tankstelle	59
Tabelle 28: Kostenschätzung Werkstatertüchtigung Brennstoffzellenbusse	60
Tabelle 29: Krampnitz - Tauglichkeit von Depotladern für erste Ausbaustufe	62
Tabelle 30: Krampnitz - Tauglichkeit von Depotladern für Endausbaustufe.....	62

1. Einführung und Problemstellung

Die EU-Richtlinie (EU) 2019/1161 über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge (Clean Vehicles Directive, CVD) schreibt Mindestziele zur CO₂-Emissionsreduzierung durch die Neubeschaffung emissionsarmer und -freier Busse im ÖPNV vor. Die CVD legt fest, dass für den ersten Zeitraum bis Ende 2025 insgesamt 45 % der neu beschafften Busse sauber sein müssen, für den zweiten Zeitraum bis Ende 2030 liegt dieser Wert bei 65 %. Von diesen sauberen Bussen müssen jeweils 50 % Null-Emissions-Busse, also lokal emissionsfreie Fahrzeuge sein. Am 15. Juni 2021 trat das Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeugBeschG) zur Umsetzung der CVD in Kraft [1, 2]. Abbildung 2 illustriert die Vorgaben der CVD. Die angegebenen Quoten zählen jeweils für den Zeitraum und nicht pro Ausschreibung. Da die Art der Umsetzung dieser Vorgaben rechtlich noch nicht vollständig geregelt ist, muss für jede Beschaffung im Einzelfall geprüft werden, inwiefern die CVD-Vorgaben gelten.

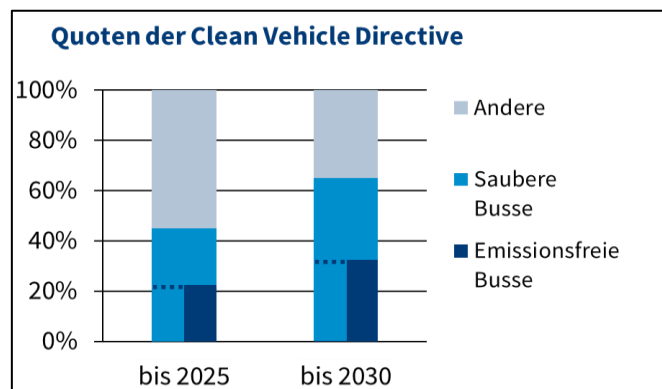


Abbildung 2: Quoten der Clean Vehicles Directive

Potsdam ist eine wachsende Stadt mit 182.000 Einwohnenden [3]. Der ÖPNV gewährleistet einen Anteil von etwa 21 % am Gesamtverkehrsaufkommen im Potsdamer Stadtverkehr [4]. Die Klimastrategie der LHP zielt auf eine Steigerung, sodass die ViP durch die Erschließung neuer Stadtgebiete wie Krampnitz sowie die mögliche Verdichtung/Takterhöhung des Busbetriebs herausgefordert ist.

Das vorliegende Elektrifizierungskonzept für die Busflotte der ViP weist mit einer Strategie für die Planung der notwendigen Infrastruktur den Weg hin zu einem nachhaltigen zukünftig auf Erneuerbarer Energie basierenden Busbetrieb. In der Studie werden Optionen und damit verbundene Kosten für eine Elektrifizierung der Busflotte der ViP aufgezeigt. Die Analyse basiert auf dem Busbetrieb von 2021.

2. Elektrifizierungsstrategie für den Busverkehr in Potsdam

Die Busflotte der ViP umfasst aktuell 14 Solo- und 46 Gelenkbusse. Durchschnittlich 10 % der Flotte wird als Reserve für Betrieb und Werkstatt vorgehalten. Die Busflotte der ViP absolviert pro Woche 343 Umläufe. Davon werden 95 von Solobussen und 248 von Gelenkbussen gefahren. Über 60 % der Umläufe erstrecken sich über eine Distanz von 150-300 km. Die maximale Länge eines Umlaufs beträgt 400,6 km. In Abbildung 3 sind die Umlauflängen gemäß dem aktuellen Fahrplan dargestellt.

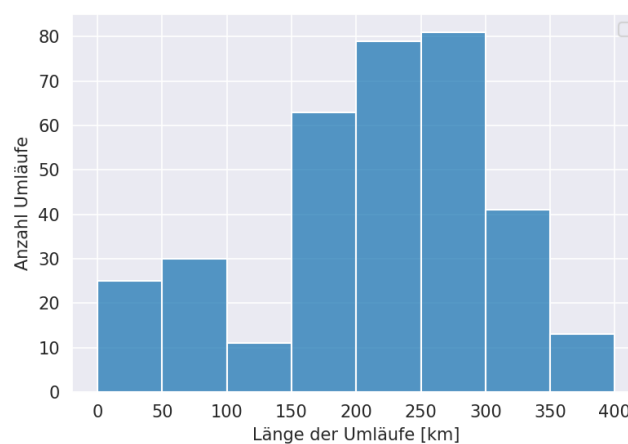


Abbildung 3: Länge der Umläufe des aktuellen Busbetriebs

Im folgenden Kapitel wird eine Elektrifizierungsstrategie für die Gesamtflotte vorgestellt. Im Fokus stehen hierbei batterieelektrische sowie Brennstoffzellenbusse.

2.1 Alternativen für den Busverkehr im Überblick

Elektrisch angetriebene Busse (E-Busse) fahren leise, vibrationsarm und lokal emissionsfrei. Damit tragen sie erheblich zur Verringerung der Lärm- und Abgasbelastung in Ballungsgebieten bei. Als Antrieb dient ein Elektromotor. In dieser Studie wurden folgende Bustypen vertieft betrachtet:

- Batteriebusse mit Depotladung und Gelegenheitsladung
- Brennstoffzellenbusse
- Hybrid-Oberleitungsbusse

2.1.1 Batteriebusse

Bei den Ladeoptionen für Batteriebusse wird zwischen Voll- oder Depotladern und Gelegenheitsladern unterschieden. Depotlader werden lediglich im Betriebshof aufgeladen. Dadurch sind die Busse sehr flexibel einsetzbar und die Infrastrukturmaßnahmen sind auf die Ertüchtigung der Betriebshöfe beschränkt. Je nach Bustyp (Solo- oder Gelenkbus) weisen Depotlader Batteriekapazitäten von 200-640 kWh auf. Das beschränkt die Reichweite i.d.R. auf 300 km [5]. Bei niedrigen Temperaturen reduziert sich die Reichweite zusätzlich. Dem Problem der beschränkten Reichweite wird durch Gelegenheitslader begegnet. Diese können zusätzlich an Endhaltestellen mit längeren Haltezeiten nachladen, wodurch auch die benötigte Batteriekapazität deutlich reduziert werden kann. Durch die nötige Nachladung an definierten Haltestellen, nimmt jedoch die Flexibilität im Einsatz der Busse ab.

Als Ladegeräte für Batteriebusse werden typischerweise Steckverbindungen, Pantographen oder Induktionslösungen eingesetzt. Die Steckverbindungen mit CCS2-Anschluss arbeiten mit Gleichstrom bei Leistungen zwischen 24-150 kW und werden primär für die Ladung in den Depots verwendet. Pantographen werden für größere Leistungen zwischen 150 kW und 1 MW sowohl an Betriebshöfen als auch an Haltestellen als Gelegenheitslader eingesetzt [6, 7]. Dabei wird nach der Positionierung des Busses der bewegliche Stromabnehmer (Pantograph) ausgefahren und der Ladevorgang startet automatisch¹.

Batteriebusse und die benötigte Ladeinfrastruktur weisen mittlerweile eine hohe Marktreife auf. Im Abschlussbericht der Begleitforschung für Innovative Antriebe im straßengebundenen ÖPNV [8] bewerten über 75 % der Verkehrsunternehmen beide Technologien als „serienreif“ oder „nahe an der Serienreife“ (Stand Sommer 2021). Die durchschnittliche Verfügbarkeit der Batteriebusse liegt mit etwa 90 % nahezu auf dem Niveau der Dieselsebusse mit 93 %. Für Batteriebusse gibt es einen etablierten Markt sowohl für 12 m- als auch für 18 m-Busse.

2.1.2 Brennstoffzellenbusse

Brennstoffzellenbusse (BZ-Busse) wandeln in einer Brennstoffzelle den Energieträger Wasserstoff in elektrische Energie um. Der erzeugte Strom treibt wiederum den elektrischen Fahrmotor des Busses an. Die im Vergleich zu Batterien von Voll- bzw. Gelegenheitsladern sehr kleine verbaute Batterie (typischerweise 20-60 kWh) dient in erster Linie zur Regelung der unterschiedlich abgerufenen Leistungen und zur Rückgewinnung der Bremsenergie (Rekuperation). Übliche Reichweiten von BZ-Bussen betragen etwa 400 km [5]. Die Betankung erfolgt über eine Wasserstofftankstelle (ähnlich einer Erdgas- oder Dieseltankstelle) und dauert ca. zehn Minuten. Dadurch sind BZ-Busse sehr flexibel einsetzbar und können Dieselsebusse bis auf wenige Ausnahmen betrieblich praktisch eins

¹ Siehe Anhang 7.2 für weitere Details zur Auswahl der Pantographen-Technologie

zu eins ersetzen. Dem gegenüber stehen jedoch hohe Anschaffungskosten pro Fahrzeug und die Investition in eine H₂-Infrastruktur.

Die technische Verfügbarkeit von Brennstoffzellenbussen liegt mit 78 % deutlich unter den Werten von Diesel- und Batteriebussen [8]. Die technologische Reife der Busse wird Bereich „Prototyp im Feldtest“ bis „seriennah“ angegeben. Die bisher errichteten Tankstellen weisen in vielen Fällen noch Forschungscharakter auf, wobei etablierte Konzepte bereits eine Verfügbarkeit von >97 % erreichen. Ein weiteres Problem stellt die Verfügbarkeit am Markt dar, sowohl von Bussen – besonders 18 m-Varianten – als auch von Ersatzteilen.

2.1.3 Hybrid-Oberleitungsbusse

Neben den genannten Technologien wurden in einer Voranalyse auch Hybrid-Oberleitungsbusse (HO-Bus) betrachtet. HO-Busse beziehen ihre Antriebsenergie auf einem Teil der Strecke aus einer Oberleitung und auf Streckenabschnitten ohne Oberleitung aus einer im Vergleich zu klassischen Batteriebussen deutlich kleineren Batterie. Voraussetzung ist daher eine eigene Oberleitungsinfrastruktur zur Stromversorgung. Eine Analyse für Berlin-Spandau hat ermittelt, dass ein streckenbezogener Oberleitungskontakt von 63 % erforderlich ist [9].

Eine gemeinsame Trassennutzung von HO-Bus und Tram wird aus technischen und genehmigungsrechtlichen Gründen ausgeschlossen. Eine bauliche Umsetzung von Oberleitungsinfrastrukturen unterliegt den genehmigungsrechtlichen Anforderungen im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens sowohl für Neubautrassen als auch bei der Integration in bestehende bauliche Infrastruktur (bspw. Oberleitungsverankerungen an Hauswänden) und ist daher mit langen Planungszeiträumen verbunden.

Aufgrund der erforderlichen Stromversorgung ist die Flexibilität von HO-Bussen stark eingeschränkt, verglichen mit Batterie- oder BZ-Bussen. Um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, müssen daher ggf. separate Busspuren im Verkehrsraum eingerichtet werden. Die Errichtung der Infrastruktur ist mit einem hohen Kostenaufwand verbunden.

Oberleitungsbusse sind somit weniger geeignet, um kurzfristig die vorgegebenen CVD-Beschaffungsquoten zu erfüllen, wenngleich die Technologie langfristig und auf geeigneten Strecken das Potential bieten kann, einen sauberen ÖPNV zu ermöglichen.

Oberleitungsbusse werden von einer kleinen Anzahl etablierter Hersteller sowohl im 12 m- als auch im 18 m- und im Doppelgelenkbus-Segment angeboten [8]. Die Busse und die benötigte Infrastruktur gelten als serienreife, erprobte und robuste Technologie.

2.1.4 Synthetische Kraftstoffe und Gas-to-Liquid

Neben der Anschaffung neuer Busse mit alternativen Antriebskonzepten gibt es auch die Möglichkeit die bestehende Diesel-Flotte weiter zu verwenden und lediglich den Kraftstoff auf eine saubere Alternative umzustellen. Die Basis hierfür sind die in der CVD [1,2]

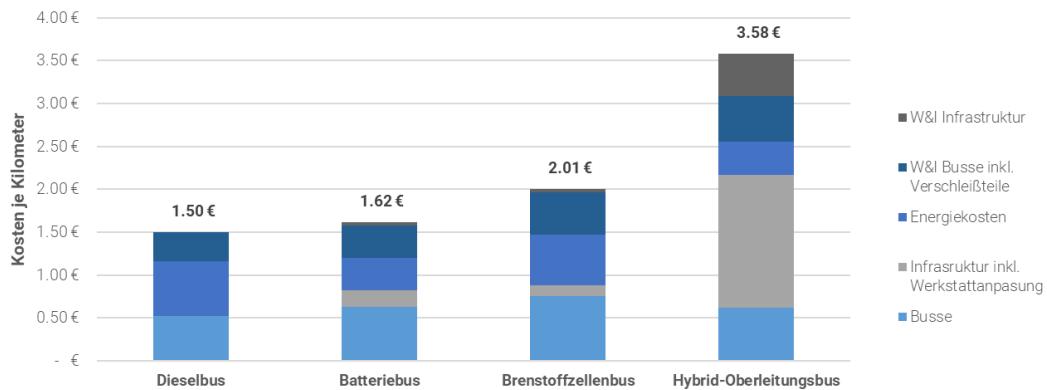
geltenden Bestimmungen. Danach kann der Teil der Quote für schwere Nutzfahrzeuge wie Busse, der als saubere Fahrzeuge beschafft werden darf, auch durch den Betrieb der Fahrzeuge mittels synthetischer und paraffinischer Kraftstoffen erfüllt werden. Paraffinischer oder synthetischer Diesel kann dabei entweder aus Erdgas (Gas-to-Liquid) oder Strom (Power-to-Liquid) hergestellt werden [10].

Das größte Hemmnis beim Einsatz dieser Technologien ist der geringe Wirkungsgrad und die damit verbundenen hohen Kosten. Während der Wirkungsgrad bei batterieelektrischen Fahrzeugen zwischen Erzeugung und Antriebsenergie bei 69 % liegt kann etwa durch die PtL-Technologie nur etwa ein Wirkungsgrad von 13 % erreicht werden [11].

Die CVD schreibt vor, dass von den sauberen Bussen 50 % emissionsfrei sein müssen. Busse mit Gas-to-Liquid oder Power-to-Liquid Technologie sind nicht emissionsfrei und können daher lediglich als Brückentechnologie angesehen werden. Durch eine Fokussierung auf den direkten Umstieg auf emissionsfreie Antriebe können Hürden bei der Umstellung vermieden und so langfristig die Kosten gesenkt werden.

2.1.5 Vergleich der Kilometerkosten für die verschiedenen Bustechnologien

Für die genannten emissionsfreien Technologien wurde ein Vergleich der Kilometerkosten mit dem Dieselmotor erstellt, welche in Abbildung 4 dargestellt ist. Dabei wurden im Sinne einer TCO-Betrachtung die Investitionskosten auf die erwartete Nutzungsdauer der einzelnen Bustechnologien, bzw. den für eine Abschreibung üblichen Zeitraum bezogen. Ein vollständige Auflistung der Annahmen, Daten und Randbedingungen für diese Analyse ist in Anhang 7.1 dargestellt. Es wurden die Investitions- und Wartungs- und Instandhaltungskosten (W&I) für Busse und Infrastruktur, sowie die Energiekosten berücksichtigt. Personalkosten sowie Schulungskosten wurden nicht in Betracht gezogen. Die Grundlage stellt ein Busbetrieb mit 60 dieselbetriebenen Bussen dar, welcher vollständig auf eine der alternativen Technologien umgestellt wird. Daher wurden für den Fall der Dieselmotorflotte keine Kosten für die Infrastruktur vorgesehen. Die Zahlen zur Busflotte und dem Busbetrieb sind an die der ViP angelehnt. Die Annahmen zum Einsatz der alternativen Technologien, wie bspw. der nötige Ausbau an Oberleitungen für HO-Busse oder das Verhältnis eingesetzter Gelegenheitslader zu Depotladern, basieren auf Literaturrecherchen und Erfahrungen anderer Busbetriebe, weshalb die Ergebnisse generelle Tendenzen darstellen und nur eingeschränkt auf ein konkretes Verkehrsunternehmen übertragen werden können.



Preisbasis 12/2021; Keine Berücksichtigung von Personalkosten; Keine Berücksichtigung von W&I Kosten für Dieselbetrieb

Abbildung 4: Vergleich der Kilometerkosten für verschiedene Bustechnologien

Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich dabei auf die Umstellung der gesamten Flotte auf eine Technologie, lediglich im Falle der Batteriebusse wird zusätzlich zwischen Depotladung und Gelegenheitsladung unterschieden. Es ist ersichtlich, dass in diesem Vergleich Batteriebusse die günstigste Alternative zu Dieselnissen darstellen, welche daher als bevorzugte Antriebstechnologie zu betrachten sind. Sowohl Brennstoffzellenbusse als auch Hybrid-Oberleitungsbusse können unter gewissen Voraussetzungen und für einzelne Linien eine sinnvolle Möglichkeit darstellen, stellen aber im Allgemeinen nicht die günstigste Technologie für den flächendeckenden Einsatz dar. Ein möglicher Antriebsmix in der Antriebstechnologie der Busflotte erhöht die Komplexität der Betriebsabläufe im Depot, sowie die benötigten Flächen für die benötigte Infrastruktur und Werkstätten.

Für einen Busbetrieb mit einer Flottenstärke der ViP und einem innerstädtischen Busdepot wird kein weiterer Mix in der Antriebstechnologie empfohlen, sondern eine Fokussierung auf batterieelektrische Antriebe angeraten.

Im Folgenden konzentriert sich die Analyse daher auf den Einsatz von Batteriebusen als Gelegenheits- und Depotlader.

2.2 Analyse und Bewertung der Umläufe

Für die Untersuchung der Flotte zur Umstellung auf batterieelektrische Busse wurden Batteriekapazitäten gemäß Tabelle 1 genutzt.² Es wurde zwischen Gelenkbussen (GB) und Solobussen (SB) sowie zwischen Depotladern und Gelegenheitsladern unterschieden.

² Die Methodik zur Ermittlung der Nutzkapazität ist in Anhang 7.3.2 erläutert.

Tabelle 1: Eingesetzte Batteriekapazitäten für Depot- und Gelegenheitslader (entsprechend eigener Marktanalyse der ViP)

Einsatz	Gesamtkapazität in kWh	Nutzkapazität in kWh
Depot – GB	490	343,0
Depot – SB	380	266,0
Gelegenheit – GB	250	157,5
Gelegenheit – SB	190	119,7

In Abbildung 5 sind die Energieverbräuche der Umläufe einer Woche im Winter und Sommer dargestellt. Zur Berechnung wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Verkehrsflüsse zu Stoßzeiten im jeweiligen Stadtbereich der Endhaltestellen.³
- Fahrzeugtyp inkl. der gewählten Batteriekapazitäten aus Tabelle 1 .
- Temperaturabhängige Verbräuche der Nebenaggregate.
- Betriebliche Vorgaben der Verkehrsbetriebe Potsdam (bspw. Einschränkung der Nachladezeit).⁴

Der Verbrauch im Winter übersteigt den Verbrauch im Sommer.⁵ Um eine ausreichende Ausstattung der Busse bei maximaler Last zu gewährleisten, basieren alle weiteren Analysen auf dem Verbrauch im Winter.

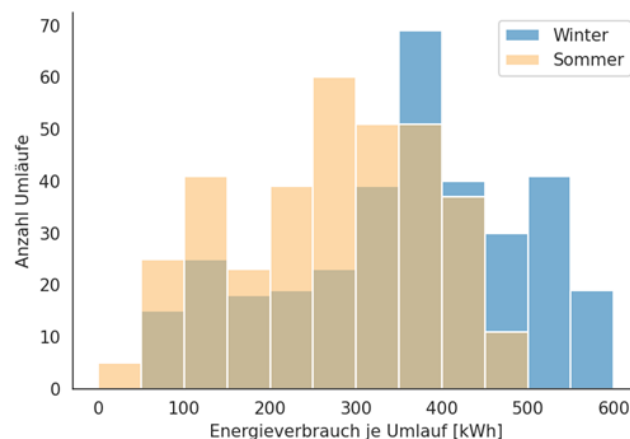


Abbildung 5: Energieverbrauch je Umlauf im Sommer und Winter

Die Eignungsprüfung von Depot- und Gelegenheitsladern erfolgte schrittweise auf Basis der Energieverbräuche je Umlauf. Sinkt der simulierte Ladezustand der Batterie-Nutzkapazität während der Fahrt unter 0 %, muss für diese Umläufe eine Zwischenladung auf der Strecke berücksichtigt werden. Mögliche Ladestandorte sind in Abschnitt 2.3 genannt.

103 Umläufe können durch Depotlader, 137 Umläufe durch Gelegenheitslader, und 103 Umläufe mit aktuellen Modellen am Markt nicht batterieelektrisch („nicht elektrifizierbar“) bedient werden. Für diese Umläufe wurde anschließend geprüft, ob eine Umlaufanpassung eine Elektrifizierung ermöglicht. Die Umlaufanpassung basiert darauf, dass ein Teil eines zu langen Umlaufs durch einen Depotlader übernommen wird, der zu der

³ Die Annahmen für Stoßzeiten in Innen- und Nicht-Innenstadt sind in Anhang 7.3.1 genannt.

⁴ Die Einschränkung der Ladezeiten an Endhaltestellen ist Anhang 7.3.3 zu entnehmen.

⁵ Eine detaillierte Methodik zur Berechnung der Energieverbräuche ist in Anhang 7.4 beschrieben.

Zeit nicht im Einsatz ist.⁶ Die Umlaufanpassung erlaubt die Elektrifizierung weiterer 55 Umläufe bei gleichbleibender Busanzahl. Der Fahrzeugwechsel findet innerhalb einer Wendezeit statt, zusätzliche Fahrten zum/vom Depot erhöhen jedoch den Energieverbrauch und Personalaufwand. Das Ergebnis nach Umlaufanpassung zeigt Abbildung 6.

Basierend auf dem aktuellen Fahrplan können 70 % der Busflotte batterieelektrisch bedient werden. Durch eine Anpassung der Umläufe und Akzeptanz eines betrieblichen Mehraufwandes kann diese Quote auf 86 % gesteigert werden.

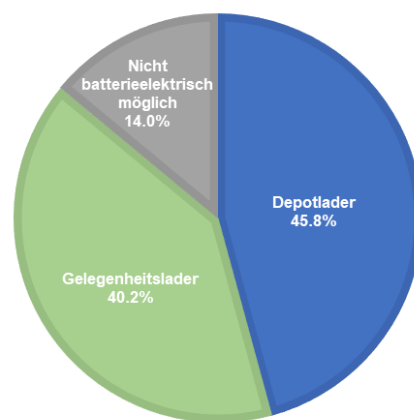


Abbildung 6: Aufteilung der Busflotte in Depotlader, Gelegenheitslader sowie nicht batterieelektrisch bedienbare Umläufe nach einer Umlaufanpassung

2.2.1 Optionen für nicht batterieelektrisch bedienbare Umläufe

Die unter den getroffenen Annahmen zu Batteriekapazitäten 48 nicht batterieelektrisch bedienbaren Umläufe verteilen sich über eine Woche. Von Montag bis Samstag sind sieben Umläufe pro Tag betroffen, am Sonntag sechs Umläufe.

Emissionsfreie Optionen für diese Umläufe wären neben Batteriebussen der Einsatz von Brennstoffzellen- oder Oberleitungsbussen. Dies würde jedoch den Aufbau einer zusätzlichen Infrastruktur benötigen. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass die CVD für den Zeitraum nach 2030 nur noch die Beschaffung von emissionsfreien Fahrzeugen zulässt. Emissionsarme Alternativen wie etwa gasbetriebene Busse sind daher ebenfalls nicht zu empfehlen, da diese Busse zeitnah wieder ersetzt werden müssen. Durch eine frühe Vollelektrifizierung kann Potsdam zudem eine Vorreiterrolle im kommunalen Busbetrieb einnehmen.

Die 48 Umläufe können, auch im Einklang mit der CVD, bis 2030 mit Dieselnbussen absolviert werden. Aufgrund der Marktentwicklung im Bereich Batteriebusse (wie bspw. Reichweitenerhöhung) wird für die weitere Betrachtung davon ausgegangen, dass die

⁶ Die Methodik der Umlaufanpassung ist in Anhang 7.6 ausführlich beschrieben.

genannten Umläufe ab dem Jahr 2030 durch Depot- oder Gelegenheitslader bedient werden können.

2.2.2 Umstellung der einzelnen Linien

In Tabelle 2 sind auf Basis des umlaufstärksten Tages (Freitag) die benötigten Bustypen angegeben und die daraus resultierenden Kosten pro Kilometer angegeben. Hierbei sind nur Kosten für die Busse und die Ladeinfrastruktur inkl. Netzanschluss berücksichtigt. Für etwa die Hälfte der Linien hat die ViP bereits ein Linienkonzept für die Umstellung.

Dieses Linienkonzept zielt darauf ab, das Betriebsrisiko zu minimieren. Daher wird mit der Elektrifizierung von Linien begonnen, die im Umfeld des Betriebshofs verkehren. So können im eventuelle Ausfälle der Elektrobusse einfach durch Reservebusse aufgefangen werden. Das Linienkonzept bildet die Grundlage für den Beschaffungsplan. Die Umstellung auf batterieelektrische Busse geht mit durchschnittlichen Kosten von 0,87 €/km einher.

Tabelle 2: Kilometerkosten der einzelnen Linien. Für unter den getroffenen Annahmen nicht elektrisch bedienbaren Umläufen (n.e.) wird eine Mischkalkulation aus Depot- und Gelegenheitsladern genutzt.

	Linie	Fahrplanjahr	Anzahl Umläufe (Freitag) ⁷					Kosten pro km
			SB-DL	GB-DL	SB-GL	GB-GL	n. e.	
Linienkonzept vorhanden	616	2024	2	0	0	0	0	1.30 €
	696	2024	0	0	3	0	0	0.59 €
	699	2025	0	0	3	0	0	0.83 €
	690	2025	0	0	0	3	0	0.68 €
	603	2026	3	0	0	0	0	0.92 €
	Shuttle Kramnitz	2026	0	2	0	0	0	1.28 €
	692	2027	1	0	0	0	0	0.62 €
	697	2027	2	0	0	0	0	0.78 €
	605	2029	0	5	0	0	2	0.90 €
Kein Linienkonzept definiert	609		0	1	1	0	0	1.38 €
	638		0	6	0	0	1	1.00 €
	693		0	0	0	3	0	0.73 €
	694		0	7	0	0	2	0.79 €
	695		0	3	0	4	0	0.90 €
	N14		0	2	0	0	0	2.69 €
	N16		1	0	0	0	0	0.72 €
	N17		0	0	0	0	0	- €
	X5		0	0	0	0	1	0.65 €

⁷ Die Kostenberechnung basiert auf dem Fahrplan 2021.

2.3 Ladestandorte für Gelegenheitsladung

Wie in Abschnitt 2.2 gezeigt benötigen 137 Umläufe eine Gelegenheitsladung auf der Strecke. Aufgrund der längeren Haltezeiten wird Gelegenheitsladung an Endhaltestellen umgesetzt. Diese müssen folgende Kriterien erfüllen:

- Ein möglichst hohes Busaufkommen sowie lange Wendezeiten,
- die Möglichkeit eines Netzanschlusses,
- ein ausreichendes Flächenangebot für eine Ladestation sowie ein Trafohäuschen
- sowie die operative Eignung seitens des Verkehrsbetriebs.

Die Bustaktung wird kontinuierlich an die Stadtentwicklung angepasst. Beim „Laden auf der Strecke“ sind bei Fahrplanänderungen künftig somit die zur Ladung erforderlichen Wendezeiten an den elektrifizierten Endhaltestellen zu beachten.

Sieben Endhaltestellen erfüllen die Anforderungen zum Aufbau von Pantografen, diese sind Tabelle 3 gelistet.⁸ Für die Zwischenladung der Gelegenheitslader wurden pauschale Verzögerungen durch Verspätungen, Fahrten zu den Ladepunkten sowie dem An- und Abdocken von der Ladezeit an den jeweiligen Endhaltestellen abgezogen.⁹

Tabelle 3: Auswahl Endhaltestellen, die elektrifiziert werden können. Die Angaben zu Wartezeiten und Fahrten beziehen sich auf eine Woche.

Endhaltestelle	Kürzel	Summe Wartezeit in min	Fahrten zu Haltestelle	Durchschnitt Wartezeit in min	Mögliche Pantographen
S Hauptbahnhof	HB	30.756	1.710	17,99	3
Bhf Rehbrücke	RE	10.279	778	13,21	2
Johannes-Kepler-Platz	JKP	7.201	828	8,70	2
S Griebnitzsee Bhf/Süd	SGS	6.024	549	10,97	1
Campus Jungferensee	CJS	4.405	269	16,38	2
Alt-Golm	GAG	1.107	199	5,56	1
Institut für Agrartechnik	IA	1.011	101	10,01	1

Die Karte in Abbildung 7 zeigt die ausgewählten Endhaltestellen sowie den Betriebshof im Stadtbild von Potsdam.

⁸ Die Beurteilung aller Endhaltestellen ist dem Anhang **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu entnehmen.

⁹ Die Einschränkung der Ladezeiten an Endhaltestellen ist Anhang 7.3 zu entnehmen.

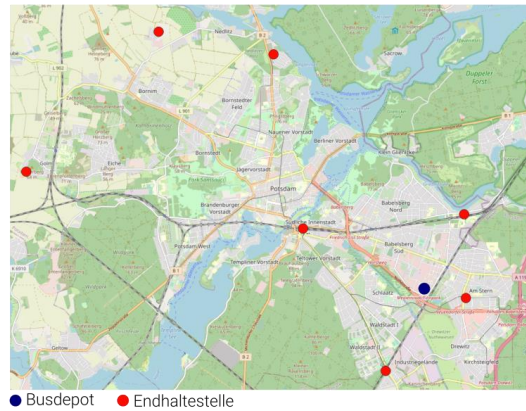


Abbildung 7: Elektrifizierte Endhaltestellen im Stadtgebiet Potsdam

2.4 Beschaffungsstrategie für Busse und Infrastruktur

Grundlage der Beschaffungsstrategie der Busse und der Infrastruktur sind der aktuelle Beschaffungsplan der ViP sowie die Vorgaben der EU-Richtlinie „Clean Vehicle Directive“ (CVD) bis 2030. Der Beschaffungsplan der ViP bis zum Jahr 2034 ist in Abbildung 8 dargestellt.

Busse	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	Summe
Solobusse	3	-	7	4	-	2	-	3	-	-	-	-	19
Gelenkbusse	8	2	3	3	-	8	9	5	6	3	-	7	54
Summe	11	2	10	7	-	10	9	8	6	3	-	7	73
Summe Busse (kumuliert)	11	13	23	30	30	40	49	57	63	66	66	73	

2023 bis 2025

45% saubere Fzg. → entspr. 11 Busse

2026 bis 2030

65% saubere Fzg. → entspr. 23 Busse

Abbildung 8: Technologieunabhängiger Busbeschaffungsplan der ViP

Zur Erreichung der CVD-Vorgaben muss die gemäß ihres Beschaffungsplan im Zeitraum 2023-2025 mind. 11 saubere Busse und im Zeitraum 2026-2030 mind. 23 saubere Busse beschafft werden. Wie beschrieben, wird empfohlen die CVD-Quote vollständig mit emissionsfreien Bussen zu erfüllen.

2.4.1 Phasen der Elektrifizierungsstrategie

Für die Entwicklung der Elektrifizierungsstrategie ist die in diesem Bericht dargestellte Busanzahl der jeweiligen Technologie sowie der jeweilige Bustyp (Solo- oder Gelenkbus) ausschlaggebend. Tabelle 4 zeigt die geplanten E-Bustypen bis 2030:

Tabelle 4: Aufteilung der Bustechnologien auf Solo- und Gelenkbusse bis 2030

Technologie	Solobusse	Gelenkbusse	Gesamt
Depot	7	5	12
Gelegenheit	4	8	12
Depot / Gelegenheit	3	7	10
Gesamt	14	20	34

Die übergeordnete Strategie sieht eine Unterteilung in eine Pilotphase (2023-2025), eine Anlaufphase (2026-2030) und eine Ausbauphase (ab 2031) vor. Dies sichert die Einhaltung der CVD-Vorgaben und in der Pilot- und Anlaufphase können Erfahrungen mit den neuen Technologien gesammelt werden, um sich für die Ausbauphase aufzustellen. Diese Strategie bietet zudem die Möglichkeit, auf eine sich ändernde Marktlage zu reagieren. Abbildung 9 zeigt die drei Phasen der Elektrifizierungsstrategie mit den zugehörigen Maßnahmen der Beschaffung von Bussen und Infrastruktur.

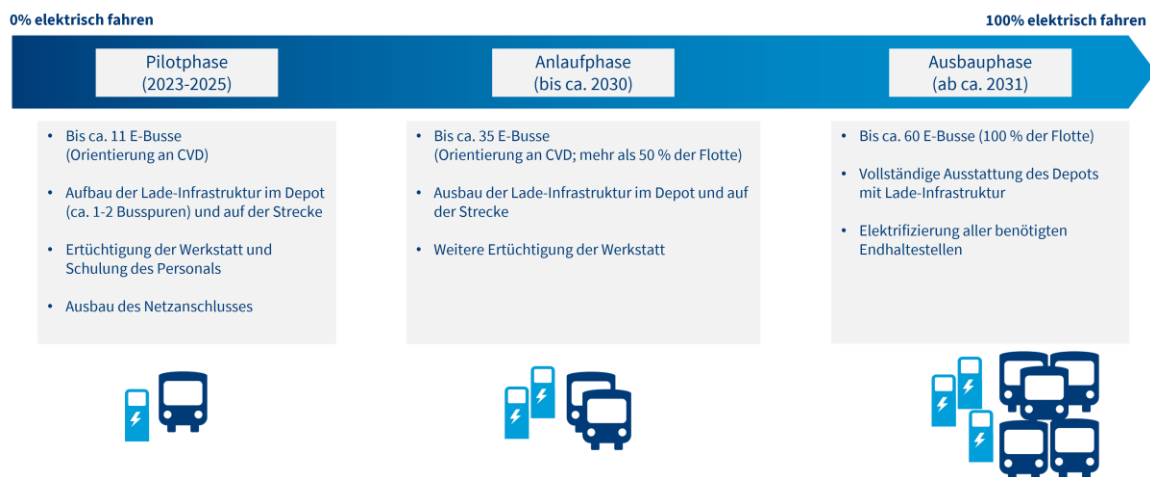


Abbildung 9: Übergeordnete Elektrifizierungsstrategie

In der **Pilotphase** werden entsprechend der CVD-Vorgaben mind. 11 E-Busse beschafft. Diese werden als Depotlader und Gelegenheitslader ausgeführt, um Erfahrungen mit den neuen Technologien zu sammeln. Parallel muss die zugehörige Ladeinfrastruktur (LIS) im Depot sowie auf der Strecke aufgebaut werden. Dazu müssten 2 Busspuren elektrifiziert werden. Die Werkstatt am Standort muss ertüchtigt und das Personal geschult werden.

In der **Anlaufphase** wird die Flotte auf mind. 34 E-Busse erweitert. Dies entspricht bis 2030 einer Elektrifizierung von über 50 % der aktuellen Busflotte. Entsprechend ist die Ladeinfrastruktur im Depot und auf der Strecke auszubauen. Zudem wird die Werkstatt für die höhere E-Busanzahl weiter ertüchtigt. In dieser Phase werden weitere Busse als Depot und Gelegenheitslader beschafft. Dabei können die gemachten Erfahrungen und die Marktlage berücksichtigt werden.

In der **Ausbauphase** wird mit der Erfahrung des Regelbetriebs die restliche Flotte elektrifiziert. Dazu wird das Depot abschließend vollständig mit Ladeinfrastruktur ausgestattet und die letzten Endhaltestellen elektrifiziert.

Aus den Mindestvorgaben der Clean Vehicle Directive und dem Beschaffungsplan der ViP leitet sich eine Busbeschaffung gemäß Tabelle 5 für die einzelnen Jahre bis 2030 ab.

Tabelle 5: Beschaffungsplan mit E-Bussen bis 2030 zur Erfüllung der CVD-Mindestvorgaben

Jahre	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	Gesamt
Diesel-SB	-	-	3	-	-	2	-	-	5
Diesel-GB	8	-	1	1	-	1	7	-	18
Depot-SB	3	-	2	2	-	-	-	-	7
Depot-GB	-	-	2	-	-	3	-	-	5
Gelegenheit-SB	-	2	-	2	-	-	-	-	4
Gelegenheit-GB	-	2	-	2	-	4	-	-	8
Batterie-SB*	-	-	-	-	-	-	-	3	3
Batterie-GB*	-	-	-	-	-	-	2	5	7
Σ Batteriebusse	3	4	4	6	-	7	2	8	34

*Noch unklar ob als Depotlader oder Gelegenheitslader ausgeführt.

Zur Erfüllung der Mindestvorgaben der CVD ist bis 2030 eine Beschaffung von 34 elektrischen Bussen erforderlich. Für einen zukunftsorientierten Betrieb wird die ausschließliche Beschaffung elektrischer Busse spätestens ab dem Jahr 2030 empfohlen.

In Abbildung 10 sind die kumulierten Investitionskosten dargestellt, die sich aus dem Beschaffungsplan aus Tabelle 5 und der dazugehörigen Infrastruktur ergeben. Zum Vergleich sind zudem die Kosten für den Weiterbetrieb mit Dieselnbussen dargestellt. Die Erfüllung der CVD-Mindestvorgaben durch Batteriebusse geht bis 2035 mit Investitionsmehrkosten von etwa 24,8 Mio. € gegenüber dem Weiterbetrieb mit Dieselnbussen einher.

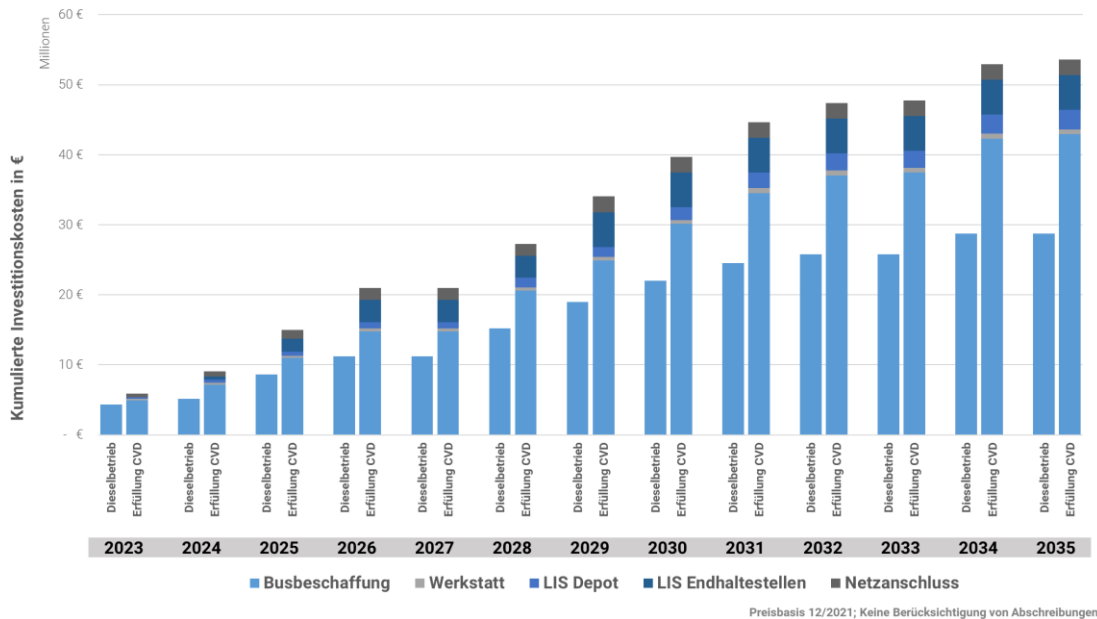


Abbildung 10: Kumulierte Investitionskosten für den Weiterbetrieb mit Dieselnbussen sowie die Erfüllung der CVD-Mindestvorgaben bis 2035

2.4.2 Roadmap der Pilotphase

Damit die Einführung der ersten E-Busse im Jahr 2023 erfolgreich realisiert werden kann, ist eine detaillierte Betrachtung der notwendigen Arbeitsschritte erforderlich. Abbildung 11 zeigt die Arbeitsschritte mit jeweiligem Zeitplan in Form eines Gantt-Diagramms. Zu erkennen ist der Zeitraum, welche für den jeweiligen Arbeitsschritt einzuräumen ist. Um Planungsungenauigkeiten oder Verzögerungen einzubeziehen, sind entsprechende Zeitpuffer dargestellt. Die Arbeitsschritte werden durch Meilensteine beendet.

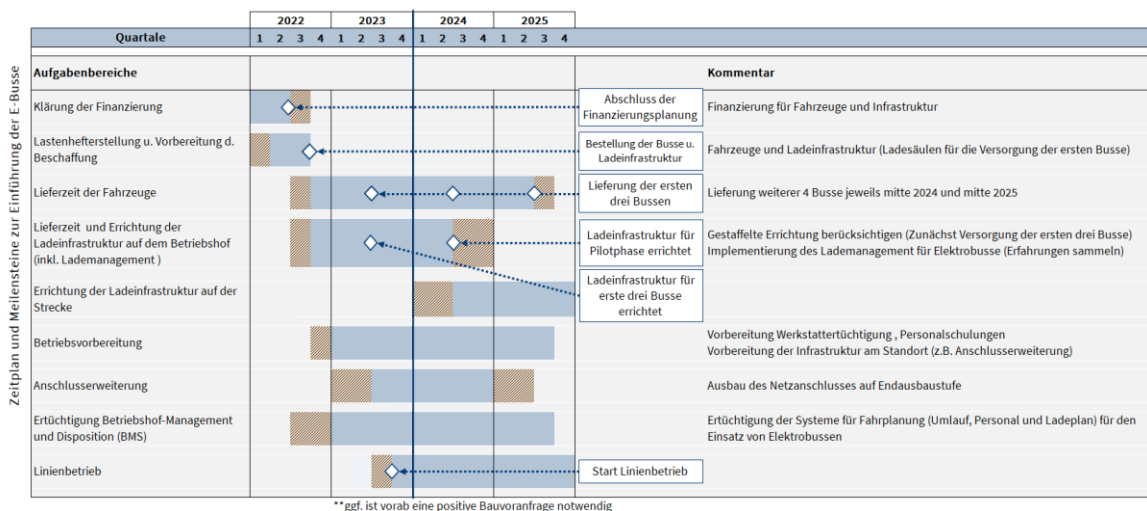


Abbildung 11: Roadmap der Elektrifizierungsstrategie bis 2025

Bis Mitte des Jahres 2022 ist die Planung der Finanzierung der Fahrzeuge sowie der entsprechenden Infrastruktur abzuschließen. Parallel kann mit der Erstellung der Lastenhefte sowie mit der Vorbereitung der Beschaffung der Busse und der zugehörigen Ladeinfrastruktur begonnen werden. Es wird vorgeschlagen, alle Beschaffungen für den Zeitraum bis Ende 2025 zusammen vorzubereiten und auszuschreiben. Die Bestellung der 11 E-Busse und der zugehörigen LIS sollte im dritten Quartal 2022 erfolgen, da mit einer Lieferzeit von mind. 12 Monaten zu rechnen ist. Eine Lieferung der ersten drei E-Busse kann so voraussichtlich vor dem geplanten Linieneinsatz Ende 2023 erfolgen. Parallel dazu ist der Betrieb der Fahrzeuge vorzubereiten. Hierzu zählt bspw. die Werkstatertüchtigung, die Personalschulung und die Vorbereitung der Infrastruktur am Depot und auf der Strecke. Notwendige Maßnahmen werden in Kapitel 3.3 näher beschrieben. Auch kann in dieser Zeit damit begonnen werden, das Lademanagement zu implementieren sowie das Betriebshof-Management zu ertüchtigen. Letzteres umfasst alle Systeme zur Fahrplanung (Umlauf-, Personal- und Ladeplanung). Mit Lieferung der ersten Busse gegen Mitte bis Ende 2023 kann der Linienbetrieb starten. Mit der Einführung der E-Busse und der zugehörigen LIS ist der Netzanschluss am Depot baulich zu erweitern. Der aktuelle Anschluss hat Kapazität für den Betrieb der ersten drei Ladepunkte, wobei diese eine Gesamtleistung von 200 kW nicht überschreiten sollten. Aus diesem Grund muss die Anschlussenerweiterung spätestens zum zweiten Lieferintervall (vier Busse in 2024) erfolgen.

Der Netzanschluss muss frühzeitig baulich erweitert werden. Dabei sollte er direkt auf die Vollelektrifizierung der Busflotte ausgelegt werden.

Für die Anlauf- und Ausbauphase ist die Darstellung einer detaillierten Roadmap zum aktuellen Zeitpunkt nicht zielführend, da die zukünftigen Entwicklungen (Markt, Fahrzeugangebot und Förderung) einen starken Einfluss haben. Festzuhalten ist, dass auch für zukünftige Beschaffungen rechtzeitig mit der Erstellung von Lastenheften und der Vorbereitung der Ausschreibung begonnen werden muss (Zeitaufwand: ca. 3-6 Monate). Es sind stets die aktuellen Lieferzeiten für E-Busse zu beachten und in die Planung mit einzubeziehen. Aktuelle Lieferzeiten für E-Bussen betragen ca. ein Jahr.

2.5 Wirtschaftliche Gesamtbetrachtung

Im Folgenden wird eine Gesamtkostenbetrachtung für die Umstellung der Busflotte auf elektrische Antriebe vorgenommen. Dabei wird eine Übersicht über die Investitionskosten und die Energiekosten im Vergleich zum Weiterbetrieb mit Dieselnbussen gegeben.

Neben den Investitions- und Energiekosten fallen im Zuge der Elektrifizierung zusätzlich Schulungskosten für das Personal an. Diese sind Anhang 7.10 zu entnehmen. Die hier aufgelisteten Kosten sind ohne mögliche Förderung angegeben.¹⁰

Tabelle 6: Gesamtkostenbetrachtung ggü. Weiterbetrieb mit Dieselnbussen

	Investitionen	Energie- u. Instandhaltung	Gesamt	Dieselnbetrieb	Mehrkosten	Mehrkosten in %
Bis 2025	15.009.795 €	2.668.880 €	17.678.675 €	11.898.003 €	5.780.672 €	49 %
Bis 2030	39.693.964 €	12.819.638 €	52.513.602 €	39.262.242 €	13.251.360 €	34 %
Bis 2035	53.577.623 €	28.767.365 €	82.344.988 €	69.968.956 €	12.376.032 €	18 %

Die Investitionsmehrkosten steigen von etwa 73 % in der Pilotphase auf 86 % in der Ausbauphase bis 2035 im Vergleich zum Weiterbetrieb mit Dieselnbussen. Demgegenüber steht eine Reduzierung der Energie- und Instandhaltungskosten. Diese Betriebskosten sind in der Pilotphase etwa 18 % geringer, bis 2035 summieren sich die Einsparungen bei Energie- und Instandhaltungskosten auf etwa 30 %.

Im Zuge der Elektrifizierung zur Erfüllung der CVD-Vorgaben kann in der Anlaufphase mit Mehrkosten von knapp 6 Mio. € bzw. 49 % im Vergleich zum Weiterbetrieb mit Dieselnbussen gerechnet werden. Bis 2030 summieren sich die Mehrkosten auf etwa 13 Mio. €, bis 2035 etwa 12 Mio. €.

Geeignete Markt- und Förderbedingungen können eine rein elektrische Beschaffung bereits in der Anlaufphase begünstigen. Würden die Verkehrsbetriebe Potsdam bereits zu Beginn von Phase 2 der CVD rein elektrisch beschaffen, würde dies zusätzliche 11 Batteriebusse bedeuten. In diesem Szenario würden bis 2035 die Investitionskosten für die Busse und die dazugehörige Ladeinfrastruktur um etwa 3,8 Mio. € steigen und die Energie- und Instandhaltungskosten um etwa 3,3 Mio. € sinken. Insgesamt bis 2035 wäre somit mit Mehrkosten von ca. einer halben Mio. € ggü. der Erfüllung der CVD-Mindestvorgaben zu rechnen.

¹⁰ Ein mögliches Förderprogramm ist: „Anschaffung von Elektrobussen im öffentlichen Personennahverkehr (BMU)“

2.5.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten im Zuge der Elektrifizierung setzen sich aus den Kosten für die Batteriebusse, der Ladeinfrastruktur, den Werkstattanpassungen sowie den Netzanschlusskosten zusammen. Zudem ist für die Batteriebusse ein Batterietausch nach 7 Jahren berücksichtigt.¹¹

Unter den getroffenen Kosten- und Umstellungsannahmen ergeben sich in der Pilotphase Mehrkosten von etwa 6,3 Mio. €. Bis zum Ende der Anlaufphase steigen diese auf etwa 17,7 Mio. € und bis 2035 auf etwa 24,8 Mio. €, was etwa 86 % Mehrkosten ggü. dem Weiterbetrieb mit Dieselnissen entspricht, wie Tabelle 7 zu entnehmen ist.

Tabelle 7: Investitionskosten ggü. Weiterbetrieb mit Dieselnissen

	E-Busse inkl. Batterietausch	Ladeinfrastruktur u. Netzanschluss	Werkstatt	Gesamt	Dieselnbetrieb	Mehrkosten
Bis 2025	11.020.000 €	3.729.795 €	260.000 €	15.009.795 €	8.660.000 €	6.349.795 €
Bis 2030	30.153.750 €	9.065.214 €	475.000 €	39.693.964 €	22.040.000 €	17.653.964 €
Bis 2035	42.916.250 €	9.971.373 €	690.000 €	53.577.623 €	28.760.000 €	24.817.623 €

2.5.2 Energie- und Instandhaltungskosten

Die Energie- und Instandhaltungskosten wurden anhand der Kosten in Tabelle 26 in Anhang 7.7 und des Beschaffungsplans kalkuliert. Bei den jährlichen Kosten für Wartung und Instandhaltung wurden neben den Bussen auch die Ladeinfrastruktur mit 2 % der Investitionskosten berücksichtigt. Daraus ergeben sich in der Anlaufphase aufgrund der geringeren Betriebskosten von elektrischen Bussen Kostenersparnisse etwa 0,6 Mio. €. Bis 2035 steigt die Ersparnis auf etwa 12,4 Mio. €, wie Tabelle 8 zu entnehmen ist.

Tabelle 8: Energie- und Instandhaltungskosten ggü. Weiterbetrieb mit Dieselnissen

	Energiekosten	Wartung u. Instandhaltung	Gesamt	Dieselnbetrieb	Mehrkosten
Bis 2025	1.524.017 €	1.144.863 €	2.668.880 €	3.238.003 €	-569.123 €
Bis 2030	6.708.732 €	6.110.906 €	12.819.638 €	17.222.242 €	-4.402.604 €
Bis 2035	14.413.194 €	14.354.171 €	28.767.365 €	41.208.956 €	-12.441.591 €

¹¹ Die Annahmen und Herleitung der Investitionskosten im Zuge der Elektrifizierung sind in Anhang 7.7 erläutert.

3. Der elektrifizierte Betriebshof

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse für die Elektrifizierung des Betriebshofs Fritz-Zubeil-Straße zusammengefasst. Dies umfasst Aussagen zu den zu erwartenden Energiemengen und Lastprofilen sowie dem Infrastrukturbedarf und den damit verbundenen Kosten. Die Energiemengen und daraus resultierenden Kosten beinhalten nur die unter den getroffenen Annahmen batterieelektrisch bedienbaren Umläufe.

3.1 Energetische Betrachtung am Betriebshof

Der Strombedarf der Busse im Depot beträgt in Summe 51,67 MWh_{el.} pro Woche. In Tabelle 9 ist der Strombedarf im Depot je Wochentag dargestellt.

Tabelle 9: Strombedarf je Wochentag im Depot

Tag	Σ Tagesfahrleistung Batteriebusse in km	Strombedarf im Depot in kWh
Montag	10.528	8.677
Dienstag	10.528	8.677
Mittwoch	10.528	8.677
Donnerstag	10.528	8.677
Freitag	10.902	9.253
Samstag	6.840	3.787
Sonntag	6.470	3.929
Σ pro Woche	66.325	51.676

Neben der Energiemenge wurden für die aktuell batterieelektrisch bedienbaren Umläufe die Auswirkungen unterschiedlicher Ladeszenarien untersucht. Dabei wurde zwischen folgenden Ladestrategien unterschieden:

- **Sofortladung:** Maximale Ladeleistung direkt nach Ankunft
- **Lademanagement:** Minimal mögliche Ladeleistung entsprechend der Standzeit

Die maximal mögliche Ladeleistung wurde auf 50 bzw. 150 kW festgelegt. Eine Ladung aller Busse mit max. 50 kW ist nicht möglich, da hiermit bei 17 Umläufen pro Woche keine Vollladung möglich wäre. Die Ladeszenarien sind in Tabelle 10 beschrieben.

Tabelle 10: Definition und Lastspitzen der Ladeszenarien am Betriebshof

Szenario	Definition	Lastspitze [kW]
1	Sofortladung für GL und DL mit 150 kW	1.500
2	Sofortladung für GL mit 50 kW und DL mit 150 kW	1.500
3	Lademanagement für GL und DL	1.028
4	Gleichzeitiges Laden mit 6 h Ladezeit	1.816

Die höchsten Ladespitzen entstehen bei den Szenarien 1 und 2 mit 1.500 kW, wohingegen das Szenario 3 mit ausgeglichenem Ladeverhalten um über 30 % geringere Lastspitzen aufweist. Je nach Ladestrategie tritt diese Lastspitze in Szenario 3 jeweils in der Nacht zum Dienstag, Mittwoch und Donnerstag auf, in den Szenarien 1 und 2 am Freitagabend, siehe auch Abbildung 12.

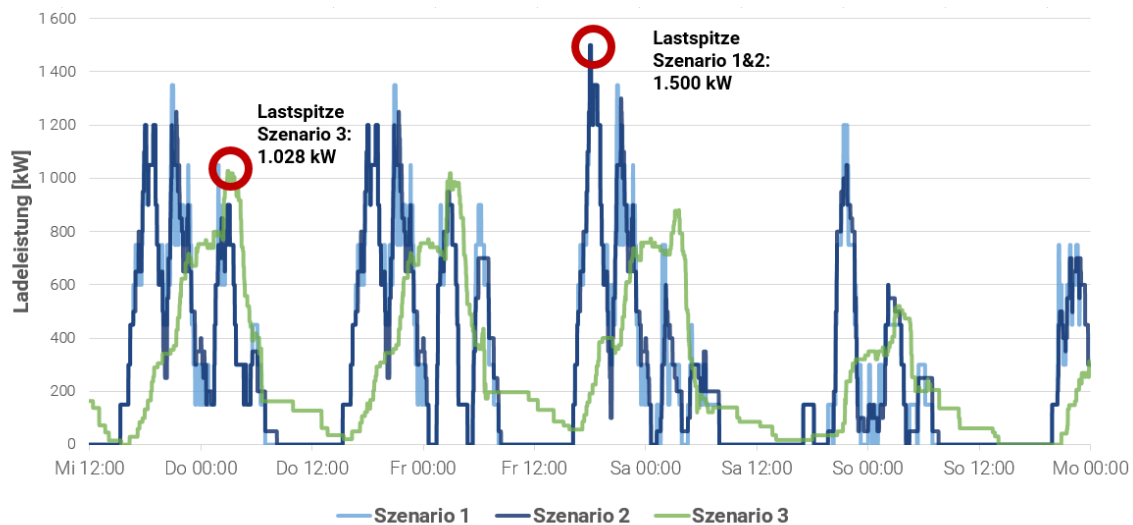


Abbildung 12: Lastprofile der unterschiedlichen Ladeszenarien am Betriebshof Fritz-Zubeil-Straße für Mittwoch bis Sonntag

Die Ergebnisse für beruhen dabei auf den Fahrplandaten zu Ankünften und Abfahrten, sowie den vorhergesagten Energiemengen. Für Service wie Reinigung und Wartung wurde pauschal angenommen, dass die Busse erst eine Stunde nach Ankunft im Depot an die Ladestation angeschlossen werden. Abweichungen zum Fahrplan und den Verbräuchen können jedoch zu einem höheren gleichzeitigen Leistungsbedarf führen. Deshalb wurde die Analyse um eine Abschätzung der maximalen Netzanschlussleistung unter nicht optimalen Bedingungen ergänzt (Szenario 4). Unter der Annahme, dass Depotlader mit einer leeren Batterie ins Depot einfahren und Gelegenheitslader mit 40 % Restkapazität (die Fahrplananalyse ergibt eine mittlere Restkapazität der Depotlader von 11 % und der Gelegenheitslader von 64 %) ergibt sich eine maximal nachzuladende Energie von 10.890 kWh für alle 56 betrachteten Busse¹². Abbildung 13 zeigt die Verteilung der Standzeiten im Depot für alle am Mittwoch beginnenden Umläufe, wobei diese im Mittel 8,5 Stunden beträgt. Um einen nötigen Sicherheitspuffer für Reinigung und Wartung zu berücksichtigen, wurde in Absprache mit der ViP die Ladezeit auf 6 Stunden reduziert. Unter der Annahme, dass alle Busse gleichzeitig Laden und ein geeignetes Lademanagement die

¹² Vgl. Aufteilung der Busse nach Tabelle 4 und Batteriekapazitäten nach Tabelle 1

Ladeleistung an die Standzeit der Busse anpasst, ergibt sich in Szenario 4 daraus eine benötigte Anschlussleistung von:

$$P_{max} = \frac{E_{ges}}{t_{stand} - t_{puffer}} = \frac{10.890 \text{ kWh}}{8,5 \text{ h} - 2,5 \text{ h}} = 1.815,12 \text{ kW}$$

Durch diese Betrachtung wird eine Abschätzung zur maximalen benötigten Netzanschlussleistung bei gleichbleibender Flottenstärke und Standzeiten erreicht. Die resultierenden Lastspitzen der verschiedenen Szenarien sind in Tabelle 10 aufgelistet.

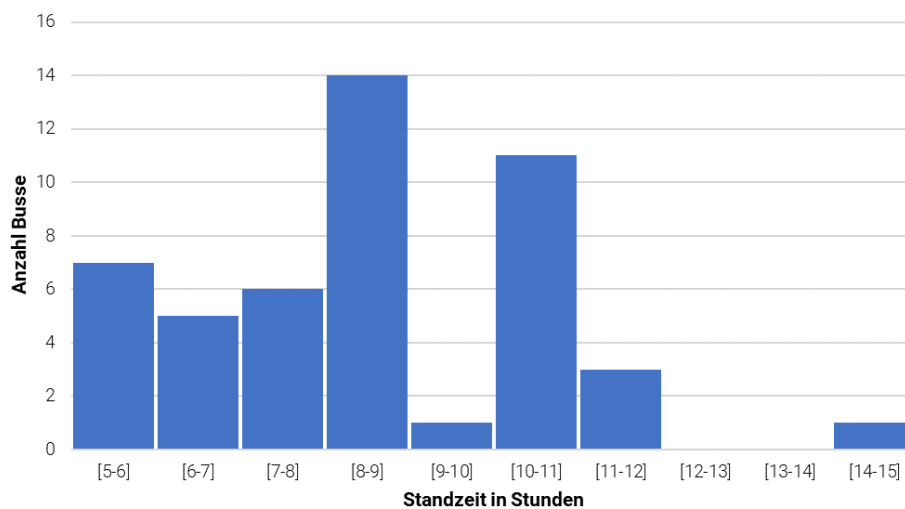


Abbildung 13: Verteilung der Standzeiten der Busse im Depot (Mittwoch)

3.2 Ladeinfrastruktur im Betriebshof

Zur Bestimmung der notwendigen Ladeinfrastruktur im Depot wurden Ladestationen mit Ladeleistungen von max. 50 kW bzw. 150 kW in Betracht gezogen. In den Szenarien 1 & 2 wird die Anzahl an Ladestationen bestimmt, die notwendig wäre, wenn die Ladestationen nach dem vollständigen Aufladen eines Busses für den nächsten Bus freigemacht würden, wodurch die theoretische untere Grenze an Ladestationen gegeben ist. Da hierfür ein Umparken oder Umstecken auch nachts notwendig wäre, was betrieblich nicht abzubilden ist, wird in Szenario 3 davon ausgegangen, dass jedem Bus ein Ladepunkt zur Verfügung steht. Dabei werden zwei Varianten unterschieden. Im Szenario 3A wird die zu installierende Ladeleistung nach Bustyp gewählt: Depotlader erhalten 150 kW-Ladepunkte, Gelegenheitslader erhalten 50 kW-Ladepunkte. Im Szenario 3B orientiert sich die zu installierende Ladeleistung am Bedarf aufgrund der Standzeit der einzelnen Busse. Für Busse, die eine Ladeleistung von über 50 kW benötigen, werden 150 kW-Ladegeräte installiert, für die restlichen Busse 50 kW-Ladegeräte.

Die Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur sind Tabelle 11 zu entnehmen. Die Kosten für die Ladegeräte setzen sich zusammen aus den Gerätekosten in Höhe von 650 €/kW [12] und den Kosten für Installation und Verkabelung, welche mit 35 % der Gerätekosten angenommen werden [13]. Die Kosten für die Netzanschlüsse wurden durch die NGP für die Endhaltestellen ermittelt (vgl. Tabelle 16). Die für das Depot angegebenen Netzanschlusskosten stellen interpolierte Werte auf Basis der Kosten für die Endhaltestellen dar, wobei ein 50 Meter langes Mittelspannungskabel angenommen wurde. Da es sich bei den Endhaltestellen um neue Netzanschlüsse handelt, am Depot jedoch eine bauliche Netzanschlusserweiterung vorzunehmen ist, können sich die Kostenstrukturen unterscheiden. Die Kosten der Trafostation werden unabhängig von der Trafoleistung mit 80.000 € kalkuliert (vgl. Abschnitt 4.3).

Tabelle 11: Bedarf und Fixkosten der Ladeinfrastruktur im Depot

Szenario	Min. nötige Anschlussleistung	Ladeleistung		Kosten Ladegeräte inkl. Installation	Kosten Netzanschluss ¹³	Gesamtkosten
		50 kW	150 kW			
1	1.500 kW	0	10	1.316.250 €	408.075 €	1.724.325 €
2	1.500 kW	9	10	1.711.125 €	408.075 €	2.119.200 €
3A	1.028 kW	21	28	4.606.875 €	333.357 €	4.940.232 €
3B	1.028 kW	44	5	2.588.625 €	333.357 €	2.921.982 €
4	1.816 kW	28	21	3.992.625 €	458.098 €	4.450.722 €
Empfehlung	1.500 kW	37	12	3.202.875 €	408.075 €	3.610.950 €

Diese Analysen berücksichtigen nicht die unter den getroffenen Annahmen nicht elektrifizierbare Umläufe. Da neben den 49 betrachteten Umläufen noch 7 weitere absolviert werden, wird empfohlen den Netzanschluss und die entsprechende Ladeinfrastruktur auf die Gesamtflotte auszulegen.

Empfehlung inkl. n. e. Busse	1.800 kW	44	12	3.510.000 €	455.565 €	3.965.565 €
-------------------------------------	-----------------	-----------	-----------	--------------------	------------------	--------------------

Den geringsten Bedarf an Ladegeräten und somit auch die geringsten Gerätekosten entstehen in Szenario 1. Demgegenüber stehen ein hoher Personalaufwand (und damit auch zusätzliche Kosten) und Platzbedarf zum Rangieren der Busse nach beendeter Vollladung. Dies lässt sich auf dem Betriebshof der ViP nur schwer bis gar nicht umsetzen. In den Szenarien 3A und 3B werden zusätzliche Personalaufwände vermieden. Dafür müssen mit dem höheren Bedarf an Ladegeräten jedoch höhere Fixkosten berücksichtigt werden. Dabei entstehen die höchsten Kosten in Szenario 3A, wenn der Ladeinfrastrukturbedarf entsprechend des Bustyps – Depot oder Gelegenheitslader – auslegt wird. Eine Auslegung nach dem prognostizierten Leistungsbedarf (Szenario 3B)

¹³ Inklusive Trafohäuschen und Baukostenzuschuss

resultiert in deutlich geringeren Fixkosten. Diese Auslegung auf die minimale Anzahl an 150 kW Ladern bietet jedoch kaum Flexibilität für den Fall, dass unvorhergesehen weitere Busse mit höherer Leistung geladen werden müssen. Für die Szenarien 3A und 3B ist ein intelligentes, an die Bedürfnisse der ViP angepasstes Lademanagementsystem erforderlich.

Bei der ViP bietet es sich an ein bis zwei Spuren für je sechs Busse am Depot mit 150 kW-Ladern und die restlichen Spuren mit 50 kW-Ladern auszustatten. Dies reduziert Kosten und berücksichtigt gleichzeitig die betrieblichen Anforderungen.

Die Versorgung der einzelnen Ladepunkte an den Bussen kann entweder mit Kabeln über das Hallendach oder über Ladepoller neben den Bussen erfolgen. Dabei ist stets die Freihaltung von Fluchtwegen zu beachten [14, 15]. Ladeeinrichtungen neben den Bussen können jedoch Auswirkungen auf die Anzahl der Spuren haben und stellen daher bei der ViP keine Option dar. Aus Platzgründen ist zudem eine zentrale Errichtung der Leistungselektronik zu empfehlen. Eine kabellose Möglichkeit bieten Pantographen, die im Hallendach verbaut sind. Dabei kann die Kontaktierung automatisiert erfolgen, wodurch das manuelle Anstecken der Busse als Fehlerquelle vermieden werden kann. Dazu müssten allerdings alle Busse gleichartig ausgerüstet sein und die Ladestationen an den Haltestellen ebenfalls nach diesem Prinzip arbeiten. Bei einer Integration der Ladevorrichtungen in das Hallendach sind die maximale Durchfahrts Höhe und Dachlasten zu berücksichtigen. Verschiedene Ladeinfrastrukturoptionen am Betriebshof sind in Abbildung 14 dargestellt. In Anhang 7.2 sind Vor- und Nachteile der zwei Pantographen-Varianten dargestellt. Aufgrund der eingeschränkten Fläche bieten sich bei der ViP Ladeeinrichtungen vom Hallendach an, entweder über Kabel oder über Top-Down-Pantographen.



Abbildung 14: Integrationsmöglichkeiten der Ladeinfrastruktur am Betriebshof [14, 16]

3.3 Anpassungsbedarf für Personal und Werkstatt

Die Einführung von Batteriebussen erfordert Anpassungen für Personal und Betriebshof. Diese Anpassung ist abhängig von den bereits vorhandenen Randbedingungen, von der gewählten Technologie sowie vom Umfang der Arbeiten, die an den Fahrzeugen durchgeführt werden sollen. Werkstatt-, Fahr- und Reinigungspersonal müssen für die Technologieanforderungen weitergebildet und sensibilisiert werden.¹⁴ Darüber hinaus muss das Depot und besonders die Werkstatt für die Anforderungen der Hochvolttechnologie ertüchtigt werden.

Anpassungsbedarf bei Hochvolt-Komponenten

Für die Arbeiten an HV-Komponenten ist es sinnvoll, einen gesonderten Arbeitsbereich einzurichten. In diesem Bereich können die Fehlerdiagnose und die Reparatur der Komponenten durch qualifiziertes Personal stattfinden. Die anfallenden Investitionskosten variieren mit dem Umfang der Aufgaben, welche von der Werkstatt durchgeführt werden sollen. Die Schulungsbedarfe¹³ können in drei Kategorien unterteilt werden:

1. Schulung des Fahr- und Reinigungspersonals sowie Arbeiten am 24-Volt-Netz der Fahrzeuge und nicht elektrotechnische Arbeiten.
2. Elektrotechnische Arbeiten im spannungsfreien Zustand.
3. Arbeiten unter Spannung am HV-System sowie Arbeiten in der Nähe berührbarer, unter Spannung stehender Teile.

Werkstattausrüstung und Werkzeug

Neben Schulungen sind für einen sicheren Betrieb weitere Ertüchtigungsmaßnahmen zu ergreifen. Zur Ertüchtigung der Werkstatt gehören zum einen sicherheitstechnische Maßnahmen wie die Installation einer zuverlässigen Lüftungsanlage, zum anderen müssen Werkzeug und sonstige Ausrüstung verfügbar sein. Die Grundausstattung einer konventionellen Buswerkstatt bietet eine gute Basis, muss allerdings adäquat erweitert werden.

Tendenziell befinden sich bei Batteriebussen mehr Komponenten auf dem Busdach als bei Dieselfahrzeugen. Daher sind entsprechende Hocharbeitsplätze hilfreich, wenn nicht erforderlich. Darüber hinaus müssen besondere Vorkehrungen getroffen werden, um die Sicherheit bei Arbeiten am Hochvoltsystem zu gewährleisten. Wegen der Gefahren, die von den Arbeiten an Hochvoltsystemen ausgehen können, ist eine vollständige Ausstattung (Spezialwerkzeuge) von großer Bedeutung. Als Orientierung empfiehlt sich der Austausch mit den Busherstellern, den Komponenten- und Systemherstellern und mit anderen Werkstätten, die bereits Erfahrungen in diesen Bereichen gemacht haben.

¹⁴ In Anhang 7.10 sind die mögliche Schulungen mit den daraus resultierenden Mehrkosten detaillierter dargestellt.

Für Fahrzeuge mit unklarem Fahrzeugzustand, bspw. aufgrund einer defekten oder technisch nicht dichten HV-Batterie ist ein sicherer Abstellplatz – ein Quarantäneplatz – einzurichten. Typischerweise werden Fahrzeuge mit unklarem Fahrzeugzustand an einem voraus festgelegten Platz abgestellt und mit Absperrband ein Radius von 5 m abgesteckt. Hinsichtlich des Brandschutzes können je nach Standort andere Abstände gefordert werden (bis zu 10 m). Es empfiehlt sich daher ein Brandschutzgutachten für den Betriebshof zu erstellen. Hierbei sind stets auch die Herstellerangaben zu beachten. Abbildung 15 zeigt mögliche Anpassungen der Werkstatt und des Depots mit zugehöriger Kostenschätzung.

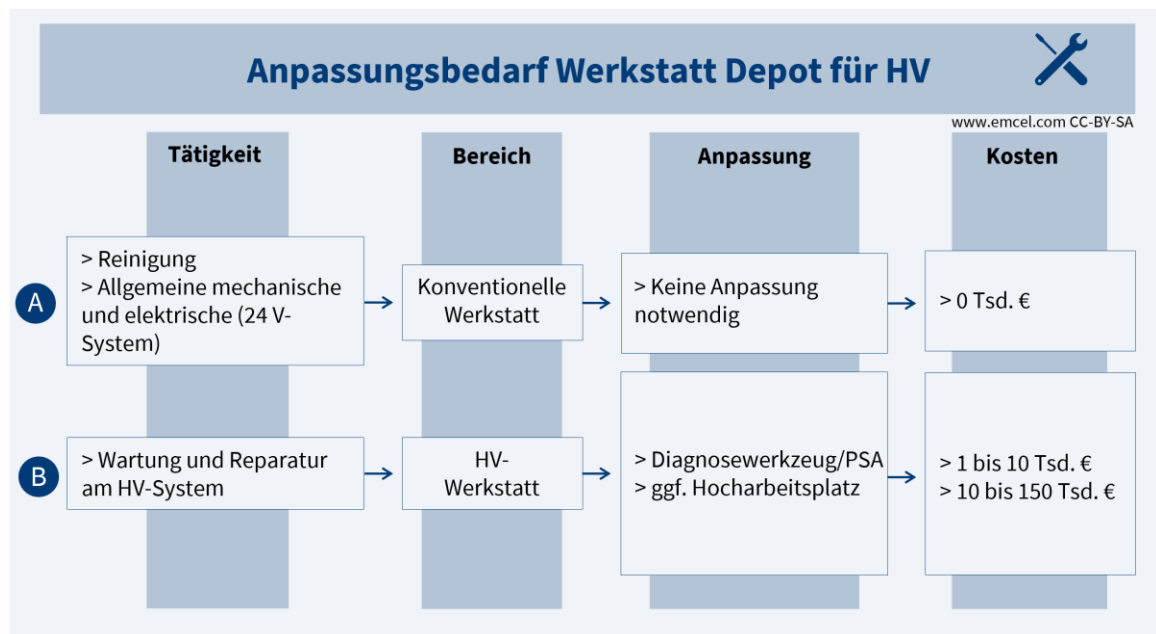


Abbildung 15: Anpassungsbedarf der Werkstatt für Hochvolt-Technologie

Tabelle 12 stellt mögliche Kosten der Ertüchtigung der aktuellen Werkstatthalle für nicht-konventionelle Arbeiten an Batteriebussen dar. Die Kosten sind hier für die Ertüchtigung einer Busposition für Gelenkbusse abgeschätzt. Unter der Annahme der Ertüchtigung von 3 Buspositionen ergeben sich Werkstattkosten von etwa 690.000 €.

Tabelle 12: Kostenschätzung Werkstatteertüchtigung¹⁵

Ertüchtigung	Kostenschätzung
Wartungsgerüst für Dacharbeitsplätze	ca. 200.000 € pro Busposition
Werkzeugbeschaffung	ca. 15.000 € pro Busposition
Ladegerät für Batteriebusse	Ca. 45.000 € pro Werkstatt

¹⁵ Eigene Angabe EMCEL

3.4 Energiekosten im Betriebshof

Die Stromkosten, die für die Ladung der Batteriebusse am Depot anfallen, setzen sich aus dem Arbeitspreis in ct/kWh und dem Jahresleistungspreis zusammen. Letzterer ist abhängig von der Jahreshöchstlast am Netzanschlusspunkt und beträgt für Mittelspannungskunden mit registrierender Leistungsmessung im Netzgebiet der Netzgesellschaft Potsdam (NGP) 20,51 €/kW*a [17]. Der Arbeitspreis der ViP setzt sich zusammen aus:

- Kosten für Beschaffung, Netzentgelte und Vertrieb: 5,3 ct/kWh
- Steuern, Abgaben und Umlagen: 2,2 ct/kWh
- EEG-Umlage (bei der Ladung von E-Bussen auf 20 % reduziert [18, 19]): 1,3 ct/kWh

Die resultierenden Energiekosten im Depot sind in Tabelle 13 für eine Flotte von 49 Bussen aufgelistet.

Tabelle 13: Energetische Kennzahlen und Stromkosten am Betriebshof für 49 Busse

Lade-Szenario	Energiebedarf je Jahr [MWh]	Anschlussleistung [kW]	Jahresleistungspreis	Jährlicher Arbeitspreis	Jährliche Stromkosten
1, 2	2.696	1.500	30.765 €	237.216 €	267.981 €
3	2.696	1.028	21.084 €	237.216 €	258.300 €
4	2.696	1.816	37.246 €	237.216 €	274.462 €
Empfehlung¹⁶	2.696	1.500	30.765 €	237.216 €	267.981 €

¹⁶ Diese Betrachtung berücksichtigt nur die unter den getroffenen Annahmen batterieelektrisch bedienbaren Umläufe. Durch die perspektivische Elektrifizierung aller Busse können zusätzliche Kosten entstehen.

4. Laden auf der Strecke

4.1 Energetische Betrachtung der elektrifizierten Haltestellen

Für die Dimensionierung des notwendigen Netzanschlusses und die Kostenberechnung wurden die Lastprofile an den sieben ausgewählten Endhaltestellen berechnet. Eine Randbedingung ist, dass während der Stoßzeiten (07:00 – 09:00 und 15:00 – 17:00) nicht geladen wird, da in diesem Zeitraum verstärkt mit Verspätungen zu rechnen ist.

Am Hauptbahnhof können bspw. 3 Pantographen errichtet werden mit einer hohen Grundauslastung eines Pantographen. Der dritte Pantograph wird hingegen nur in wenigen Fällen pro Woche genutzt. Dies ist in Abbildung 16 dargestellt: Werden alle 3 Pantographen zeitgleich verwendet beträgt die Gesamtleistung $3 \cdot 450 \text{ kW} = 1350 \text{ kW}$.¹⁷

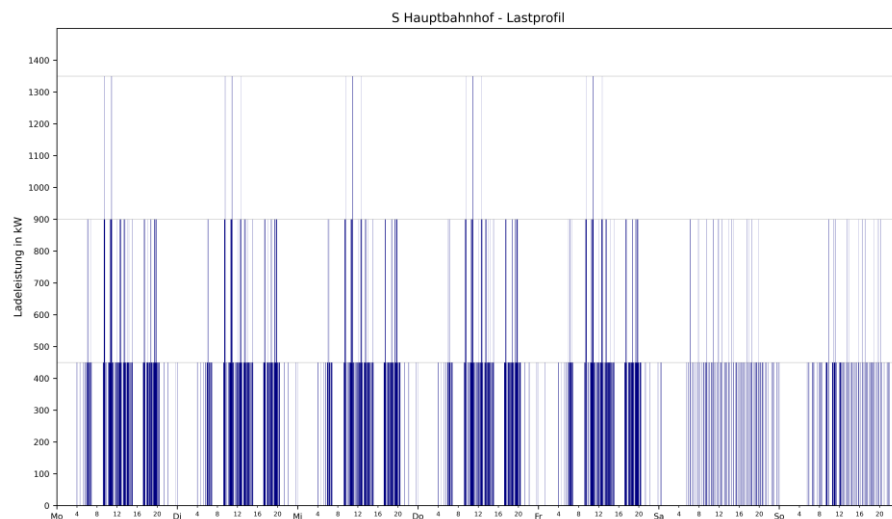


Abbildung 16: Lastprofil an der Endhaltestelle S Hauptbahnhof mit drei möglichen Pantographen.

Die Analyse zeigt, dass an fünf von den ausgewählten sieben Endhaltestellen der ViP die betrieblich maximal mögliche Anzahl an Pantographen auch in Anspruch genommen werden. An den Haltestellen Johannes-Kepler-Platz und Campus Jungferensee wird jedoch gemäß aktuellem Fahrplan nur einer von zwei möglichen Pantographen in Anspruch genommen.

4.2 Ladeinfrastruktur an den elektrifizierten Haltestellen

Ein schematischer Aufbau der an den Haltestellen notwendigen technischen Anlagen ist in Abbildung 17 dargestellt. Die Energieversorgung erfolgt aus dem Mittelspannungsnetz, das in Potsdam eine Spannung von 10 kV aufweist. Dazu muss vom Kunden (ViP) eine Trafostation errichtet werden, die im Stadtgebiet Potsdam begehbar ausgeführt werden muss. Der Netzbetreiber (NGP) bzw. die Energie- und Wasser Potsdam (EWP) stellt in dieser

¹⁷ Die weiteren Lastprofile der anderen Endhaltestellen sind im Anhang 7.8 zu finden.

den Mittelspannungsanschluss in Form einer Mittelspannungsschaltanlage her. In der Anlage werden der MS-/NS-Transformator und der Niederspannungsverteiler vom Kunden installiert und betrieben. Zusätzlich berücksichtigt die Gebäudedimensionierung den Einbau von Mittelspannungsschalt- und Messtechnik durch die ViP. Die so bereitgestellte Niederspannung versorgt die Ladestationen, die aus einem Ladeschrank und dem Lademast bestehen. Im Ladeschrank wird 400 V Wechselstrom zu Gleichstrom mit einer für die Ladung der Busbatterie geeigneten Spannung gewandelt. Dieser Gleichstrom wird schließlich mittels eines Pantographen an den Bus übertragen.

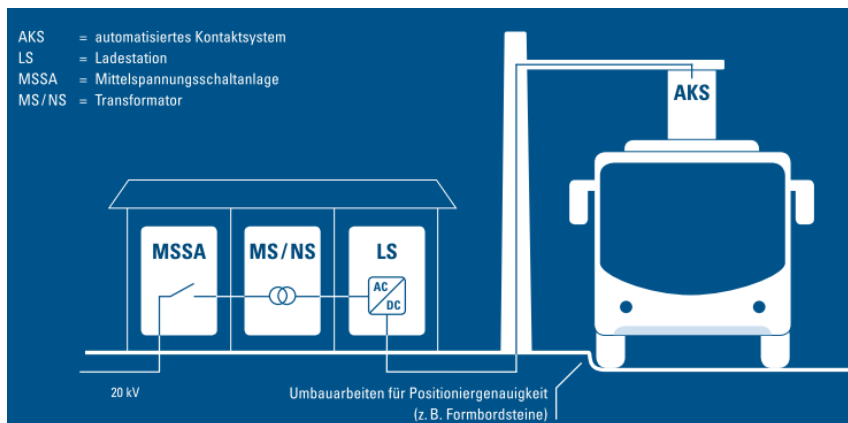


Abbildung 17: Schematischer Aufbau einer Ladestation [12]

Tabelle 14 gibt einen Überblick über die Bauelemente, die zur Errichtung der Ladeinfrastruktur an den Endhaltestellen benötigt werden. Die Anzahl der zu errichtenden Bauelemente richtet sich nach der Anzahl der zu installierenden Ladestationen je Haltestellen. Wie in Abschnitt 4.1 erläutert, wird an der Haltestelle Johannes-Kepler-Platz gemäß aktuellem Fahrplan der ViP nur ein Pantograph benötigt. Aus Gründen der Redundanz und Flexibilität im Betrieb an dieser wichtigen Haltestelle wurden in den weiteren Analysen jedoch Kosten und Flächenbedarfe für die Installation von zwei Ladestationen am Johannes-Kepler-Platz angenommen.

Tabelle 14: Übersicht über die zur Ladung der Busse zu errichtenden Bauwerke

Bauwerk	Abmessungen (LxBxH)	Elemente
Begehbare Trafostation	4,60 m x 2,70 m x 3,25 m	<ul style="list-style-type: none"> MS Schaltanlage der ViP MS Schalt- und Messeinrichtung MS/NS Transformator bis zu einer Leistung von 3000 kVA. NS Verteilung
Ladeschrank	2,50 m x 1,50 m x 2,10 m	<ul style="list-style-type: none"> Leistungselektronik
Lademast	Fundament: 2,20 m x 2,40 m	<ul style="list-style-type: none"> Pantograph zur Stromübertragung

Tabelle 15 gibt einen Überblick über die einzelnen Haltestellen, die Anzahl der benötigten Ladestationen und der erforderlichen Netzanschlussleistung. Diese Werte basieren auf dem Fahrplan von 2021. Es ist wichtig, die Planung der Endhaltestellenelektrifizierung stets an die Entwicklungen im Nahverkehrsplan anzupassen.

Tabelle 15: Übersicht der Endhaltestellen mit Ladeinfrastruktur

Endhaltestelle	Anzahl benötigte Ladestationen	Anschlussleistung [kW]
S Hauptbahnhof	3	1.350
Bhf Rehbrücke	2	900
Johannes-Kepler-Platz	2	900
S Griebnitzsee Bhf/Süd	1	450
Campus Jungfernsee^{18, 19}	2	900
Alt-Golm	1	450
Institut für Agrartechnik¹⁸	0	0

Die Platzierung der erforderlichen Bauwerke an den Haltestellen erfolgte in Absprache mit der EWP und der ViP nach den folgenden Kriterien:

- Betriebliche Eignung der Ladestandorte,
- Einfache Anfahrbedingungen, um Positionierungstoleranzen einhalten zu können,
- Einhaltung der Mindestabstände um Bauwerke: 1,5 m vor Türen; 0,5 m zu jeder Seite zur Belüftung,
- Anbindungsmöglichkeit an das Mittelspannungsnetz.

In dieser Planungsphase wurde die bauliche Eignung der Standorte und die Eigentumsverhältnisse der Grundstücke nicht berücksichtigt. Abbildung 18 zeigt den Vorschlag zur Positionierung der Ladeinfrastruktur am Hauptbahnhof, die Planung zu den weiteren Haltestellen können dem Anhang 7.9 entnommen werden.



Abbildung 18: LIS am Hauptbahnhof

¹⁸ Nach der Analyse des Fahrplans von 2021 ist am Institut für Agrartechnik eine Ladestation vorzusehen. Aufgrund einer geplanten Änderung der Streckenführung durch die ViP sollen die entsprechenden Linien zukünftig am Campus Jungfernsee geladen werden. Für die Betrachtung der Platzbedarfe und Energiemengen an den Haltestellen wird daher im Folgenden keine Ladestation am Institut für Agrartechnik geplant, sondern diese inklusive des dort anfallenden Energiebedarfs der Endhaltestelle Campus Jungfernsee zugerechnet.

¹⁹ Sobald die Tram im Einsatz ist, ist zu prüfen, ob eine zweite Ladestation an der Haltestelle CJS notwendig ist. Aufgrund der zukünftigen Streckenplanung bietet es sich an stattdessen eine Ladestation am Bahnhof Marquardt (MQB) zu installieren.

4.3 Kosten der Ladestandorte

Die Kosten der Ladeinfrastruktur setzen sich aus den Kosten für die Ladestation (Lademast und Ladeschrank), die Trafostation und die bauliche Umgestaltung der Haltestelle zur besseren Befahrung durch die Busse zusammen. Nach [13] werden die Kosten für die Errichtung der Ladestation 1.000 €/kW angesetzt. Hierbei sind keine Umbaukosten für die Haltestelle berücksichtigt. Diese hängen stark von den Gegebenheiten vor Ort ab und müssen in der nächsten Planungsphase berücksichtigt werden. Die Kosten für Kompakt-Trafostationen belaufen sich nach [12] und [20] auf etwa 50.000 €. Aufgrund der Anforderung begehrter Trafostationen in Potsdam werden nach Absprache mit der EWP Kosten je Station von 80.000 € angesetzt. Im Bereich von 450 kW bis 1.500 kW wird dabei nicht nach den installierten Trafoleistungen unterschieden, da deren Einfluss auf die Gesamtkosten gering sind. In einer vorläufigen Kostenschätzung hat die NGP die erwarteten Netzanschlusskosten, inklusive der Einbauten des Netzbetreibers innerhalb der Kundeneigenen Trafostation, und die Baukostenzuschüsse für die Erschließung der Haltestellen ermittelt. Tabelle 16 zeigt eine Übersicht dieser Kosten.

Tabelle 16: Kosten für die Errichtung der Ladeinfrastruktur an den ausgewählten Endhaltestellen

Haltestelle	Anzahl Ladestationen	Netzanschluss ²⁰	Baukostenzuschuss	Kosten Ladestationen	Kosten Trafohäuschen	Gesamtkosten
HB	3	73.750 €	213.705 €	1.350.000 €	80.000 €	1.717.455 €
RE	2	107.500 €	142.470 €	900.000 €	80.000 €	1.229.970 €
JKP	2	73.750 €	142.470 €	900.000 €	80.000 €	1.196.220 €
SGS	1	90.625 €	71.235 €	450.000 €	80.000 €	691.860 €
CJS	2	90.625 €	142.470 €	900.000 €	80.000 €	1.213.095 €
GAG	1	73.750 €	71.235 €	450.000 €	80.000 €	674.985 €
Summe						6.723.585 €

Neben den Kosten für die LIS-Errichtung fallen Kosten für die Strombereitstellung an, deren Zusammensetzung in Abschnitt 4.2 erläutert ist. Tabelle 17 gibt eine Übersicht über die daraus resultierenden Stromkosten an den einzelnen Haltestellen.

²⁰ NGP: Kostenschätzung für Netzanschlüsse Strom aus Mittelspannung für geplante Ladeinfrastruktur des öffentlichen Personennahverkehrs in Potsdam, Vorgangsnummern 901315240 - 46

Tabelle 17: Energiebezugskosten an den ausgewählten Endhaltestellen

Haltestelle	Strombedarf je Jahr [MWh]	Anschlussleistung [kW]	Jährlicher Leistungspreis	Jährlicher Arbeitspreis	Jährliche Stromkosten
HB	1.355	1.350	27.689 €	119.205 €	146.893 €
RE	483	900	18.459 €	42.465 €	60.924 €
JKP	222	900	18.459 €	19.512 €	37.971 €
SGS	369	450	9.230 €	32.485 €	41.715 €
CJS	266	900	18.459 €	23.400 €	41.859 €
GAG	70	450	9.230 €	6.194 €	15.424 €
Summe²¹	2.764		101.525 €	243.261 €	344.786 €

5. Ausblick auf Busvorlauf Krampnitz

Im Norden von Potsdam entsteht ab dem Jahr 2024 das neue Siedlungsgebiet Krampnitz. Wie jeder andere Stadtteil muss auch dieser verkehrlich angebunden werden. Gemäß dem Angebotskonzept vom 29.09.2020 sieht die Planung der ViP den Betrieb von sieben Strecken bis ca. zum Jahr 2029 vor. Anschließend wird die Streckenanzahl auf fünf reduziert, da Krampnitz ab diesem Zeitpunkt über eine Tram angebunden werden soll.

Die aktuellen Planungen sehen Streckenlängen von 272 bis 452 km in der ersten Stufe bis 2029 und 298 bis 423 km in der Endausbaustufe vor. Mit den in dieser Studie genutzten Annahmen zu Batteriekapazitäten sind diese Streckenlängen nicht mit Depotladern bedienbar. Unter den getroffenen Annahmen zur Batteriekapazität ist die Reichweite mit Solobussen auf 204 km (Kapazität: 380 kWh) und mit Gelenkbussen auf 225 km (Kapazität: 490 kWh) beschränkt. Selbst bei erhöhten Batteriekapazitäten von 474 kWh für Solobusse und 640 kWh für Gelenkbusse²² sind lediglich in der ersten Ausbaustufe zwei Umläufe mit Depotladern abbildbar.²³

Zur Erschließung des Quartiers Krampnitz sollte frühzeitig der Einsatz von Gelegenheitsladern geprüft und entsprechend die Elektrifizierung der Endhaltestellen geplant werden.

Einige der geplanten Umläufe teilen sich Haltestellen. Für eine kosteneffiziente Planung sollte beim Einsatz von Gelegenheitsladern daher geprüft werden, wie viele elektrifizierte Endhaltestellen aus betrieblichen Gründen notwendig sind.

²¹ Diese Betrachtung berücksichtigt nur die unter den getroffenen Annahmen batterieelektrisch bedienbaren Umläufe. Durch die perspektivische Elektrifizierung aller Busse können zusätzliche Kosten entstehen.

²² Aktuell maximale Batteriekapazitäten gemäß interner Marktrecherche der ViP.

²³ Eine Übersicht über die einzelnen Umläufe ist Anhang 7.12 zu entnehmen.

6. Quellen

- [1] Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz, 2021, <https://www.gesetze-im-internet.de/saubfahrzeughbesch/SaubFahrzeugBeschG.pdf>, Zugriff am 06.10.2021
- [2] Europäische Union, Clean Vehicles Directive, Richtlinie (EU) 2019/1161, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L1161&from=DE>, Zugriff am 06.10.2021
- [3] Landeshauptstadt Potsdam, Bevölkerung: Einwohner nach Stadtteilen, <https://www.potsdam.de/bevoelkerung-einwohner-nach-stadtteilen>, Zugriff am 13.10.2021
- [4] Landeshauptstadt Potsdam, Verkehrsbefragung Potsdam, 2018, https://www.potsdam.de/sites/default/files/documents/verkehrsbefragung_potsdam_2018_s-teckbrief.pdf, Zugriff am 13.10.2021
- [5] EnergieAgentur.NRW GmbH, Elektrobusse in NRW - Technik und Marktentwicklung, 2020, https://www.elektromobilitaet.nrw/fileadmin/Daten/Download_Dokumente/Brosch%C3%BCren_Flyer/E-Busse_in_NRW.pdf, Zugriff am 13.10.2021
- [6] Schunk, Automatisiertes Nachladen mit Pantographentechnologie, <https://www.schunk-group.com/transit-systems/de/innovationen/smart-charging>, Zugriff am 13.10.2021
- [7] Siemens, SICHARGE UC - Die leistungsstarke Lösung zum Laden Ihrer Elektroflotte, 2021, <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:f9bf2cab-8daf-4acd-b1bc-91a98bb274ec/sicharge-uc-broschuere-leistungsstarke-loesung-zum-laden.pdf>, Zugriff am 13.10.2021
- [8] NOW, Abschlussbericht Programmbegleitforschung Innovative Antriebe und Fahrzeuge (2021)
- [9] Fraunhofer ISI, Machbarkeit eines Hybridoberleitungsbusbetriebs – „Berlin-Spandau“, 2019
- [10] BMUV, Kraftstoffe für den Einsatz in Ottomotoren, <https://www.bmu.de/themen/luft-laerm-mobilitaet/verkehr/kraftstoffe>, Zugriff am 22.04.2022
- [11] Agora Energiewende, The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels (2018), https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynKost_Study_EN_WEB.pdf
- [12] NOW GmbH, „Leitfaden für Busse mit alternativen Antrieben“, 2021, https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/03/Leitfaden-fuer-Busse-mit-alternativen-Antrieben_NOW.pdf, Zugriff am 13.10.2021
- [13] Fraunhofer IVI, E-Bus-Standard, 2017, https://www.erneuerbar-mobil.de/sites/default/files/2018-04/Abschlussbericht_E-Bus-Standard.pdf, Zugriff am 13.10.2021
- [14] sphaera, Emissionsfreie Energie- und Antriebskonzepte für Stadtbusse zur Umsetzung der europäischen Clean Vehicles Directive, 2020, <https://www.vdv.de/emissionsfreie-energie-und-antriebskonzepte-fuer-stadtbusse.pdf>, Zugriff am 20.10.2021
- [15] VDV, VDV-Schrift 825: Auswirkungen der Clean Vehicles Directive im Linienbus auf Betriebshöfe und Werkstätten, 2019
- [16] Schunk, 100 Elektrobusse für Airport Schiphol Niederlande, <https://www.schunk-group.com/transit-systems/de/anwendungen/elektrische-fahrzeuge/elektrobusse>, Zugriff am 20.10.2021
- [17] Netzgesellschaft Potsdam GmbH, Preisblatt Netznutzung NGP, 2021, https://www.ngp-potsdam.de/content/netze/pdf_9/preisblatt_netzentgelte_strom_ngp_2021.pdf, Zugriff am 09.11.2021

- [18] BDEW, BDEW-Strompreisanalyse Juni 2021, 2021, https://www.bdew.de/media/documents/BDEW-Strompreisanalyse_no_halbjaehrlich_Ba_online_10062021.pdf, Zugriff am 09.11.2021
- [19] Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2011§ 65a, https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/_65a.html, Zugriff am 09.11.2021
- [20] Deutsche Energieagentur, dena-Verteilnetzstudie, 2012, <https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/dena-verteilnetzstudie>, Zugriff am 09.11.2021
- [21] INFRAS, PSI,Quantis; Bus-Antriebe im Vergleich: Eine Ökobilanz (2020)
- [22] DLR, Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV (2015)
- [23] BDEW, BDEW Strompreisanalyse Januar 2022
- [24] I. Tsiropoulos, Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications (2018)
- [25] VDV, Zwischenbilanz Elektrobusse im ÖPNV (), <https://www.vdv.de/200204-charts-pressegesprach-zwischenbilanz-e-busse.pdf>
- [26] Rocky Mountain Institute, Reducing EV Charging Infrastructure costs (2019)
- [27] ABB, Elektrofahrzeuginfrastruktur: Ladelösungen für schwere Nutzfahrzeuge, 2021, https://library.e.abb.com/public/eea5a4bb09064cf0896138f96948a2e0/4EVC901401-LFEN_Heavy%20Vehicle%20Charging%20solutions%20portfolio_DE.pdf, Zugriff am 13.10.2021
- [28] P. Lima, PushEVs, Battery charging: Full versus Partial, 2021, <https://pushevs.com/2018/04/27/battery-charging-full-versus-partial/>, Zugriff am 04.08.2021
- [29] M. Faltenbacher, Erkenntnisse aus der Praxis - Betriebliche, ökologische und ökonomische Bewertung emissionsfreier Busse, 2021, https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/09/Begleitforschung-Bus_Faltenbacher.pdf, Zugriff am 04.08.2021
- [30] D. Fasthuber, „Einsatzmöglichkeiten von E-Bussen im Linienbetrieb,“ 4. Fachtagung "e-mobil in niederösterreich", 2018, https://www.ecoplus.at/media/9068/e_mobil_fasthuber_ebusse.pdf, Zugriff am 05.08.2021
- [31] P. D. R. Pütz, Quo vadis Linienbusantrieb? - Potenziale unterschiedlicher Antriebs-/Kraftstoffoptionen, VDV-Jahrestagung 2014 - Spartenreffen Bus, Berlin, 2014
- [32] BMVI, Berechnung des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen des ÖPNV - Leitfaden zur Anwendung der europäischen Norm EN 16258, https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/energieverbrauch-treibhausgasemission-oePNV.pdf?__blob=publicationFile, Zugriff am 05.08.2021
- [33] Gräper, Eine Übersicht der Gräper Kompaktstationen, 2016, https://www.graeper.de/Download/Broschuere_Uebersicht_Kompaktstationen_web.pdf, Zugriff am 24.11.2021
- [34] B. Reuter et al., New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots, 2017, http://newbusfuel.eu/wp-content/uploads/2017/03/NewBusFuel_D4.3_Guidance-document-for-large-scale-hydrogen-refuelling_final.pdf, Zugriff am 20.10.2021

7. Anhang

7.1 Annahmen und Randbedingungen für die Berechnung der Kilometerkosten



	Wert	Quelle, Kommentar
Busbetrieb		
Anzahl Busse	60	Eigene Angabe: ViP
Anzahl Linien	25	Eigene Angabe: ViP
Länge Busliniennetz [km]	254	Eigene Angabe: ViP
Solobusse - Anzahl	14	Eigene Angabe: ViP
Gelenkbusse - Anzahl	46	Eigene Angabe: ViP
Verhältnis Gelegenheitslader zu Depotlader	50:50	Annahme
Solobus - Umlauflänge [km]	215	Eigene Angabe: ViP
Gelenkbus - Umlauflänge [km]	240	Eigene Angabe: ViP
Solobus - Fahrleistung im Jahr [km]	67 264	Hochrechnung mit Annahme
Gelenkbus - Fahrleistung im Jahr [km]	75 086	Hochrechnung mit Annahme
Verhältnis Busse zu LIS Gelegenheit	3	Eigene Angabe: RLI
Technologie		
Batterie		
Solobusse - Depot - Batteriekapazität [kWh]	380	Annahme
Solobusse - Gelegenheit - Batteriekapazität [kWh]	190	Annahme
Gelenkbusse - Depot - Batteriekapazität [kWh]	490	Annahme
Gelenkbusse - Gelegenheit - Batteriekapazität [kWh]	250	Annahme
E-Busse Lebensdauer [Jahre]	14	[21]
Batterien Lebensdauer [Jahre]	7	[9]: Mittelwert 6-8 Jahre
E-Solobus - Verbrauch [kWh/km]	1.2	[8]
E-Gelenkbus - Verbrauch [kWh/km]	1.8	[8]
Brennstoffzelle		
H ₂ -Busse Lebensdauer [Jahre]	14	[21]
H ₂ -Gelenkbus Verbrauch [kg H ₂ /km]	0.113	[8]
H ₂ -Solobus Verbrauch [kg H ₂ /km]	0.085	[8]
Diesel		
Diesel-Busse Lebensdauer [Jahre]	10	ViP
Diesel-Solobus Dieselverbrauch [l/km]	0.42	[13]
Diesel-Gelenkbus Dieselverbrauch [l/km]	0.55	[13]
Hybrid-Oberleitung		
HO-Busse Lebensdauer [Jahre]	16	[9]
HO-Solobus Verbrauch [kWh/km]	1.2	Annahme: Wie Solo-BEV
HO-Gelenkbus Verbrauch [kWh/km]	1.8	Annahme: Wie Gelenk-BEV
HO-Solobus Batteriekapazität [kWh]	46.7	Annahme: Im gleichen Verhältnis kleiner als GB wie Verbrauch
HO-Gelenkbus Batteriekapazität [kWh]	70	[22]

Energiekosten		
Energiekosten [€/kWh]	0.229 €	[23] Strompreis Industrie inkl Steuer ohne EEG-Umlage
Wasserstoffkosten [€/kg H ₂]	5.50 €	Eigene Angabe: EMCEL
Dieselpreis [€/l]	1.225 €	Eigene Angabe: ViP
Kosten Busse		
Batterie		
Solobus ohne Batterie	420 000 €	[24,25]
Gelenkbus ohne Batterie	600 000 €	[24,25]
Batteriekosten [€/kWh]	250 €	[3]
E-Solobusse Wartungskosten [€ / km]	0.24 €	[13]
E-Gelenkbusse Wartungskosten [€ / km]	0.30 €	[13]
Diesel		
Diesel Solobus	320 000 €	Eigene Angabe: ViP
Diesel Gelenkbus	420 000 €	Eigene Angabe: ViP
Diesel Solobus Wartungskosten	0.28 €	[13]
Diesel Gelenkbus Wartungskosten	0.35 €	[13]
Brennstoffzelle		
H ₂ Solobus	625 000 €	[8]
H ₂ Gelenkbus	825 000 €	[8]
H ₂ Busse Wartungskosten	0.49 €	[8]
Hybrid-Oberleitung		
HO Solobus ohne Batterie	532 000 €	Annahme: Verhältnis GB zu SB wie bei BEV-Bussen
HO Gelenkbus ohne Batterie	760 000 €	[22]
HO-Gelenkbus W&I Kosten [€/km]	0.50 €	[9]
Kosten Infrastruktur		
BEV-Infrastruktur		
Kosten Ladegerät [€/kW] inkl. Installation	877.50 €	[26]
Depot-Ladegerät Gelegenheit -50kW	43 875 €	[26]
Depot-Ladegerät Depot -100kW	87 750 €	[26]
HPC Gelegenheit Ladegerät 450 kW	450 000 €	[13]
Netzanschluss: Netzanschlussleistung im Depot [kW]	1923	[14]
Netzanschlusskosten im Depot mit 2 MW	487 225 €	Eigene Angabe: RLI
Netzanschlusskosten je 450 kW Ladestation	161 235 €	Eigene Angabe: RLI
Werkstattanpassung BEV-Flotte	690 000 €	Eigene Angabe: EMCEL
Wartungs- und Instandhaltungskosten E-Bus	2%	[13], jährlich bezogen auf Investitionskosten
Infrastruktur [% CAPEX p.a.]		
H₂-Infrastruktur		
Werkstattanpassung H ₂ -Flotte	765 000.00 €	Eigene Angabe: EMCEL
Netzanschlussleistung im Depot [kW]	1000	Eigene Angabe: EMCEL
Netzanschlusskosten im Depot	328 925.00 €	Eigene Angabe: EMCEL
Kosten H ₂ -Tankstelle mit Speicher	6 500 000 €	Eigene Angabe: EMCEL
Wartungs- und Instandhaltungskosten H ₂ -Bus	3%	Eigene Angabe: EMCEL, jährlich bezogen auf Investitionskosten
Infrastruktur [% CAPEX p.a.]		
HO-Infrastruktur		
Oberleitungsinfrastruktur [€/km]	425 000 €	[9, 22]: Mittelwert
Benötigter Anteil Oberleitung	60%	[9]: Angelehnt an Szenario B
Unterwerke [€/Linie]	1 720 000 €	[22]
Ladepunkte am Betriebshof [€/Bus]	15 900 €	[22]
Werkstattanpassung HO-Flotte	690 000 €	Annahme: Anpassung wie für BEV
Wartungskosten HO-Bus Infrastruktur	2%	[9], jährlich bezogen auf Investitionskosten

7.2 Besonderheiten bei der Pantographen-Technologie

Für Pantographen basierte Kontaktsystemen lassen sich Bottom-Up und Top-Down Pantographen unterscheiden. Bei Ersterem ist der Pantograph auf dem Dach des Busses montiert, während am Mast eine unbewegliche Kontakthaube befestigt ist. Bei Letzterem, auch invertierter Pantograph genannt, befindet sich der bewegliche Teil am Mast, auf dem Dach der Busse ist eine Kontaktschiene angebracht. Tabelle 18 fasst Vor- und Nachteile beider Systeme zusammen.

Tabelle 18: Vor- und Nachteile verschiedener Pantographen (Bildquelle: [27])

	Vorteile	Nachteile
Bottom-Up Pantograph 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Schlankere Lademasten ✓ Größere Positionstoleranz ✓ Kontakthaube kann auch im Depot / an Decke angebracht werden ✓ Mehrere Kontakteinheiten pro Ladezentrum möglich (serielles Laden) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mehr bewegliche Stromabnehmer notwendig • Höhere Gesamtinvestitionen • Höheres Busgewicht
Top-Down Pantograph 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Geringeres Busgewicht ✓ Kompatibel mit verschiedenen Fahrzeugtypen (Doppeldecker, LKW, Spezialfahrzeuge...) ✓ Weniger Wartungsaufwand an Fahrzeugen ✓ Mehr Sicherheit im Fahrgastbetrieb, da keine beweglichen Teile auf dem Bus 	<ul style="list-style-type: none"> • Höherer Wartungsaufwand an Ladestationen • Bei Wartung/ Ausfall der Technik keine Redundanz • Geringere Positionstoleranz

7.3 Randbedingungen für die Berechnungen

Im Folgenden werden die bei der Berechnung der Energiebedarfe und Ladeleistungen getroffenen betrieblichen und technischen Randbedingungen und Annahmen erläutert.

7.3.1 Stoßzeiten

In den Hauptstoßzeiten wird an den Endhaltestellen nicht nachgeladen, da es hier aufgrund des Verkehrs verstärkt zu Verspätungen kommen kann. Bei den Stoßzeiten wird zwischen Innenstadt- und Nicht-Innenstadtbereich unterschieden. Der angenommene Innenstadtbereich ist entsprechend der Markierung in Abbildung 19 definiert. Innerhalb der Innenstadt wird während der Hauptstoßzeiten morgens und nachmittags Stop&Go-Verkehr angenommen, außerhalb der Innenstadt dagegen dicht gesättigter Verkehr. Darüber hinaus wird während der erweiterten Stoßzeiten in der Innenstadt dicht gesättigter Verkehr angenommen. Tabelle 19 gibt eine Übersicht über die Stoßzeiten.

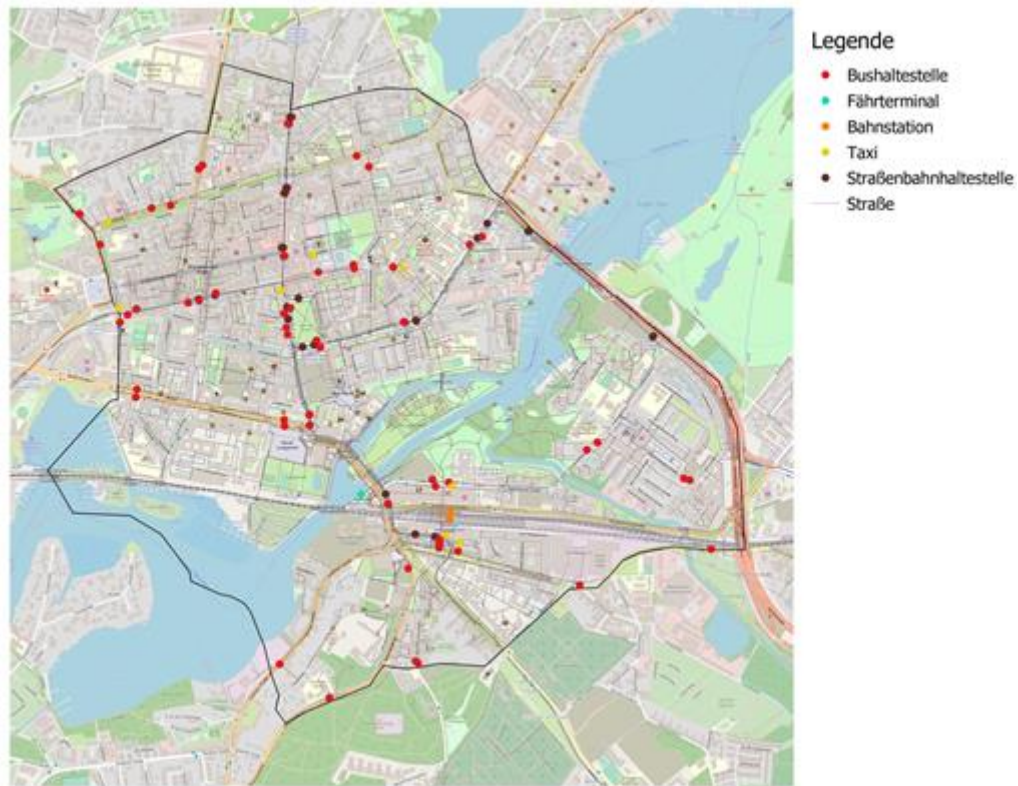


Abbildung 19: Innenstadtbereich Potsdam

Tabelle 19: Verkehrsfluss zu Stoßzeiten

Stoßzeiten	Innenstadt	Nicht-Innenstadt
07:00 – 09:00	Stop&Go	dicht gesättigt
14:00 – 15:00	dicht gesättigt	frei fließend
15:00 – 17:00	Stop&Go	dicht gesättigt
17:00 – 18:00	dicht gesättigt	frei fließend
Sonstige Zeiten	frei fließend	frei fließend

7.3.2 Batteriekapazitäten und Ladeleistung

Es werden unterschiedliche Batteriekapazitäten für Depot- und Gelegenheitslader sowie für Solo- und Gelenkbusse angenommen. Neben der Gesamtkapazität einer Batterie ist die Nutzkapazität von großer Bedeutung. Dies Nutzkapazität beträgt nach den Annahmen dieser Studie für Depotlader 70 % der Gesamtkapazität [28]. Da die Belastung bei Gelegenheitsladern durch die deutlich höheren Ladeleistungen besonders hoch ist, wird ein zusätzlicher Puffer vorgesehen und die nutzbare Batteriekapazität beträgt $70\% \cdot 90\%$.

Tabelle 20 gibt einen Überblick über die angenommenen Nutzkapazitäten nach Abzug von Kapazitätsreserven / Verlusten. Des Weiteren wird die Ladeleistung an den Endhaltestellen der Gelegenheitslader mit 423,4 kW angenommen. Diese Leistung ergibt sich durch die Anrechnung von Verlusten beim Laden von $0,97 \cdot 0,97$, die sich aus den Verlusten für das Ladegerät [7] und für die Batterieladung [29] ergeben.

Tabelle 20: Angenommene Batteriekapazitäten

Einsatz	Gesamtkapazität in kWh	Nutzkapazität in kWh
Depot – GB	490	343
Depot – SB	380	266
Gelegenheit – GB	250	157,5
Gelegenheit – SB	190	119,7

7.3.3 Beeinträchtigung der Ladezeiten an Endhaltestellen

Um die Ladezeiten an den Endhaltestellen zu bestimmen, werden zusätzliche Verzögerungen an den Endhaltestellen berücksichtigt. Diese Verzögerungen werden von der jeweiligen Wartezeit abgezogen. In Tabelle 21 sind die Verzögerungen je Endhaltestelle aufgeschlüsselt.

Tabelle 21: Beeinträchtigung der Ladezeiten an Endhaltestellen

Endhaltestelle	Fahrt zu Ladestation in Minuten	Verspätung in Minuten	An- und Abdocken in Minuten	Gesamte Verzögerungen in Minuten
HB	4	3	1	8
RE	2	2	1	5
JKP	2	3	1	6
SGS	2	2	1	5
CJS	2	2	1	5
GAG	1	2	1	4
IA	2	3	1	6

7.4 Berechnung der Energiebedarfe

7.4.1 Energieverbrauch der Fahrten

Die Berechnung des Verbrauchs der Fahrten wird abhängig von dem Fahrzeugtyp (Solobus - SB und Gelenkbus - GB), der Umgebungstemperatur sowie der Verkehrsart berechnet. Die Verkehrsart wird für jede Ankunftszeit einer Fahrt entsprechend der in Tabelle 19 genannten Stoßzeiten festgelegt. Die Umrechnung des Verbrauchs in kWh zieht

sowohl Tank-to-Wheel Verluste als auch den Wirkungsgrad des Antriebs mit ein. Der Wirkungsgrad des Elektroantriebs wird mit 90 % angenommen [30]. Tabelle 22 zeigt den Energieverbrauch pro 100 km von Diesel- und Batteriebussen.

Tabelle 22: Energieverbrauch pro 100 km

Bustyp	Jahreszeit	Dieselverbrauch in Liter pro 100 km (oben) und kWh/km (unten)			Durchschnitt
		frei fließend	dicht gesättigt	Stop&Go	
SB	Frühling/Herbst	26,0	37,4	48,0	36,5
		0,79	1,14	1,47	1,12
SB	Winter	26,9	38,7	49,6	37,7
		0,82	1,18	1,52	1,15
SB	Sommer	26,2	37,7	48,3	36,8
		0,80	1,15	1,48	1,12
GB	Frühling/Herbst	33,1	46,2	51,8	45,1
		1,01	1,41	1,58	1,38
GB	Winter	34,0	47,5	53,1	46,3
		1,04	1,45	1,62	1,41
GB	Sommer	33,3	46,5	65,2	45,4
		1,02	1,42	1,99	1,39

Der Dieselverbrauch in Liter aus Tabelle 22 wird entsprechend der folgenden Formel in kWh umgerechnet:

$$EF = \frac{(DV * TTW * HW)/100}{\eta}$$

EF: Energieverbrauch Fahrt in kWh/km

DV: Dieselverbrauch Fahrt in Liter/100 km

TTW: Wirkungsgrad Dieseltraktion Tank-to-Wheel = 0,275 [31]

HW: Heizwert Diesel = 10 [32]

η : Wirkungsgrad elektrischer Antriebsstrang = 0,9

7.4.2 Nebenverbrauch Heizung

Der Nebenverbrauch der Heizung wird während der Fahrt sowie während der Pausenzeiten berechnet. Bei den Pausenzeiten wird davon ausgegangen, dass die Nebenaggregate nach 2 min Standzeit ausgeschaltet werden. In Tabelle 23 ist der temperaturabhängige Verbrauch der Heizung in kWh/km für die drei Verkehrsflüsse aufgeschlüsselt. Der Energieverbrauch der Fahrt (EHF) setzt sich aus dem temperatur- und verkehrsabhängigen Wert und der Strecke der Fahrt in km zusammen.

Tabelle 23: Nebenverbrauch Heizung während der Fahrt in kWh/km (Abgeleitet von [13])

Temperatur in °C	Verbrauch in kWh / km		
	Frei fließend	Dicht gesättigt	Stop&Go
-2,50	0,45	0,58	0,75
-1,25	0,42	0,54	0,70
0,00	0,41	0,50	0,64
1,25	0,38	0,47	0,59
2,50	0,35	0,43	0,54
3,75	0,32	0,39	0,48
5,00	0,30	0,35	0,43
6,25	0,26	0,32	0,39
7,50	0,24	0,28	0,35
8,75	0,21	0,24	0,31
10,00	0,18	0,22	0,27
11,25	0,15	0,18	0,23
12,50	0,12	0,15	0,20
13,75	0,10	0,11	0,18
15,00	0,06	0,078	0,13
16,25	0,03	0,05	0,10
17,50	0	0,02	0,07

Der Nebenverbrauch während der Standzeiten wird wie folgt berechnet:

$$EHS = \frac{WZ}{60} * v_{mean} * NV_{gesättigt}(T)$$

EHS: Energieverbrauch Heizung in kWh

WZ: Wartezeit in min

v_{mean}: mittlere Geschwindigkeit

NV: Nebenverbrauch in kWh/km

T: Temperatur in °C

Der Gesamtverbrauch der Heizung berechnet sich wie folgt:

$$EH = EHF + EHS$$

EH: Energieverbrauch Heizung in kWh

EHF: Energieverbrauch Heizung während der Fahrt in kWh

EHS: Energieverbrauch Heizung während der Standzeit in kWh

7.4.3 Nebenverbrauch Kühlung

Der Nebenverbrauch der Kühlung wird wie der NV der Heizung für die Fahrt sowie die Standzeiten berechnet. Es wird erneut angenommen, dass Nebenaggregate nach 2 min Standzeit ausgeschaltet werden. Weiter wird davon ausgegangen, dass die Kühlung erst ab einer Temperatur von 26 °C angeschaltet wird und im Stand unabhängig von der Außentemperatur mit konstanter Leistung läuft. Der Nebenverbrauch der Kühlung während der Fahrt wird demnach pauschal wie folgt berechnet:

$$EKF = EF_{km} * f_{K\u00fchlung} * SF$$

EKF: Energieverbrauch Kühlung während der Fahrt in kWh

EF_{km}: Energieverbrauch Fahrt in kWh/ km

f_{K\u00fchlung}: Zusätzlicher Energiebedarf durch Kühlung = 0,125 [13]

SF: Länge der Fahrt in km.

Der Nebenverbrauch der Kühlung während der Standzeit lautet:

$$EKS = \frac{WZ}{60} * P_{K\u00fchlung}$$

EKS: Energieverbrauch Kühlung während der Wartezeit in kWh

WZ: Wartezeit in min

P_{K\u00fchlung}: Konstante Leistung Kühlung in kW= 3 kW [30]

Der Gesamtverbrauch der Kühlung setzt sich damit wie folgt zusammen:

$$EK = EKF + EKS$$

EK: Energieverbrauch Kühlung in kWh

EKF: Energieverbrauch Kühlung während der Fahrt in kWh

EKS: Energieverbrauch Kühlung während der Wartezeit in kWh

7.5 Eigenschaften aller Endhaltestellen

Um mögliche Standorte für Zwischenladung zu identifizieren, wurden die Pausenzeiten an den Endhaltestellen der Linien analysiert. Durch die Berechnung der gesamten Pausenzeit sowie der durchschnittlichen Pausenzeit an jeder Endhaltestelle wurde ein Ranking erstellt. In Abstimmung mit der ViP wurden Endhaltestellen mit einer Pausenzeit größer 5 min auf Flächenkapazität und Netzanschluss für die Ladeinfrastruktur geprüft. Dabei wurden für die Berechnungen insgesamt 8 Haltestellen als geeignet identifiziert. Die Analyse ergab, dass die Endhaltestelle *Am Schragen* für die Energieversorgung nicht von Bedeutung ist, daher wurde sie im Verlauf der weiteren Berechnungen nicht weiter berücksichtigt.

Tabelle 24 zeigt die Übersicht über alle Endhaltestellen. Blau gekennzeichnete Haltestellen wurden für weitere Analysen in Betracht gezogen.

Tabelle 24: Eigenschaften aller Endhaltestellen - Wartezeiten, Potenzial für mögliche Pantographen sowie Einschätzung der operativen Eignung.

Endhaltestelle	Kurzname	Summe Wartezeit in min	Anzahl Fahrten zu Endhaltestelle	Mittlere Wartezeit in min	Mögliche Ladepunkte	Operative Eignung
S Hauptbahnhof	HB	30.756	1.710	17,99	3	ja
Bhf Rehbrücke	RE	10.279	778	13,21	2	ja
Johannes-Kepler-Platz	JKP	7.201	828	8,70	2	ja
Wissenschaftspark Golm	GOPC	6.854	446	15,37	1	nein
S Griebnitzsee Bhf/Süd	SGS	6.024	549	10,97	1	ja
Küsselstr.	KÜ	5.697	380	14,99	0	
Campus Jungfernsee	CJS	4.405	269	16,38	2	ja
Platz der Einheit/West	PLW	3.783	254	14,89	0	
S+U Rathaus Spandau	RSP	3.753	236	15,90	0	ja
Stern-Center/Gerlachstr. Klinikum	SCG	1.660	392	4,23	0	
	KLI	1.185	83	14,28	0	
Alt-Golm	GAG	1.107	199	5,56	1	ja
S Babelsberg/Schulstr.	SBS	1.015	377	2,69	0	
Institut f. Agrartechnik	IA	1.011	101	10,01	1	ja
S Babelsberg/Lutherplatz	SBL	876	354	2,47	1	ja
Bhf Pirschheide	PP	836	258	3,24	1	ja
Neues Palais	NP	833	49	17,00	0	
Kirche Kartzow	KAR	600	20	30,00	0	
Konrad-Wolf-Allee/Sternstr.	KWA	570	49	11,63	0	
Bhf Golm	GOLU	520	20	26,00	0	
Hoffbauer-Stiftung	HOS	395	20	19,75	0	
Höhenstr.	HS	371	251	1,48	1	ja
Camp. Universität/Lindenallee	CUL	360	15	24,00	0	
Bhf Charlottenhof	BC	284	76	3,74	0	
Am Upstall	FUP	268	30	8,93	0	
Am Schragen	AS	200	5	40,00	1	ja
Heinrich-Heine-Weg	NFHS	160	4	40,00	0	
S Wannsee	SWS	140	27	5,19	0	
Kirschallee	KA	110	5	22,00	0	
Bhf Golm/Universität	SGOL	102	34	3,00	0	
Rathaus Babelsberg	RHB	95	5	19,00	0	
Birkenweg	GGB	72	9	8,00	0	
S Nikolassee	SNIK	60	31	1,94	1	nein
Brentanoweg	BTW	53	16	3,31	0	
Waldsiedlung	GGW	35	5	7,00	0	
Groß Glienicke						
Robert-Baberske-Str.	RB	0	235	0,00	0	

7.6 Methodik der Umlaufanpassung

Für Umläufe, die nicht elektrifizierbar sind, wird geprüft, ob eine Teilung des Umlaufs dazu führen kann, dass der Umlauf insgesamt durch zwei Busse abgedeckt werden kann. Weil die Gesamtzahl der Busse konstant bleiben soll, muss ein Teil des geteilten Umlaufs von einem anderen Depotbus übernommen werden. So wird dafür gesorgt, dass mehr Umläufe elektrifiziert werden können während die Anzahl der Busse konstant bleibt. Busse, die am Ende ihres Umlaufs noch ausreichend Restkapazität haben, können zusätzlich einen Teil eines anderen Umlaufs übernehmen. In Abbildung 20 ist das Verfahren der Umlaufanpassung schematisch dargestellt.

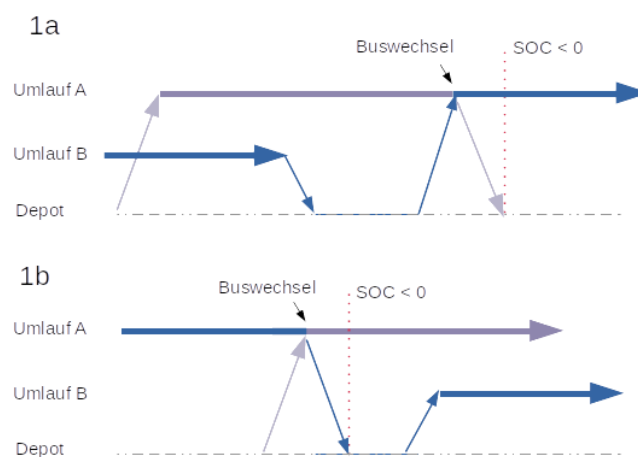


Abbildung 20: Methodik der Umlaufanpassung

Es wird angenommen, dass der Bus vor bzw. nach einem Wechsel zurück ins Depot fährt. Dabei werden durchschnittlich 20 Minuten Fahrtzeit zum Depot angenommen. Der Verbrauch wird anhand des durchschnittlichen Verbrauchs der vorhergehenden bzw. folgenden Fahrt berechnet.

7.7 Kostenbetrachtung

In diesem Abschnitt wird die Herleitung der Investitionskosten und der Energiekosten einer elektrifizierten Flotte ggü. einem Weiterbetrieb mit Dieselnissen erläutert.

7.7.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten im Zuge der Elektrifizierung setzen sich aus den folgenden Kostenpunkten zusammen:

- Batteriebusse,
- Batterietausch nach 7 Jahren,
- Ladeinfrastruktur inkl. Netzanschluss sowie
- Werkstattanpassungen.

In Tabelle 25 sind die Kostenannahmen für die jeweiligen Bustechnologien und einen Batterietausch für Solo- und Gelenkbusse und die aus dem Beschaffungsplan bis 2035 resultierenden Gesamtkosten angegeben. Für die Busse, die noch nicht durch ein Linienkonzept abgedeckt sind, wurde mit dem Kosten-Mittelwert aus Depot- und Gelegenheitsladern kalkuliert. Die Kostenannahmen für Batteriebusse ergeben sich aus [12] und [13]. Die Kosten für Dieselnisse sind aktuelle ViP-interne Anschaffungskosten.

Tabelle 25: Kosten für Bustechnologien

Bustyp	Depotlader	Gelegenheitslader	Dieselnisse
Solobus	515.000 €	467.500 €	320.000 €
Gelenkbus	722.500 €	662.500 €	420.000 €
Batterietausch Solobus	95.000 €	47.500 €	
Batterietausch Gelenkbus	122.500 €	62.500 €	
Σ Kosten CVD minimal		42.916.250 €	
Σ Kosten Vollelektrifizierung ab 2026		46.038.750 €	

Die Kosten für die Ladeinfrastruktur im Betriebshof beruhen auf Tabelle 11. Für die Erfüllung der Mindestvorgaben der CVD sind bis 2035 50 Ladepunkte zu installieren, bei einer Vollelektrifizierung ab 2026 ergeben sich 61 Ladepunkte. Die Investitionsmehrkosten dieses Szenarios betragen rund 4 Mio. €.

Unter der Annahme, dass im Betriebshof zwölf 150 kW-Ladepunkte für zwei Spuren aufgebaut werden und die restlichen Ladepunkte eine Leistung von 50 kW aufweisen, ergeben sich für die Ladeinfrastruktur im Betriebshof bis 2035 Kosten von etwa 2,79 bzw. 3,43 Mio. €. Die Kosten für die bauliche Erweiterung des Netzanschlusses werden auf etwa 455.565 € geschätzt. Die Kosten für die LIS auf der Strecke inkl. Netzanschluss ergeben sich aus Tabelle 16 zu etwa 6,72 Mio. €. Unter der Annahme der Ertüchtigung von 3 Buspositionen und dem Aufbau eines Ladepunkts ergeben sich gemäß Tabelle 12

Werkstattkosten von etwa 690.000 €. Dies resultiert zur Erfüllung der CVD in Gesamtinvestitionskosten von etwa 53 Mio. € und damit Investitionsmehrkosten von 24 Mio. € gegenüber dem Weiterbetrieb mit Dieselnbussen.

7.7.2 Energiekosten

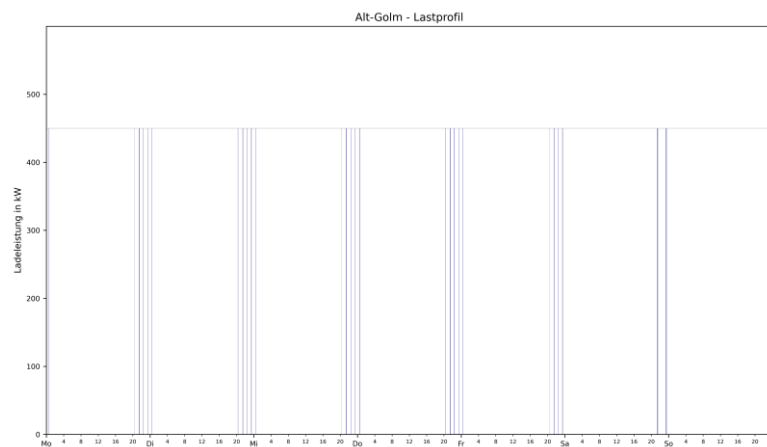
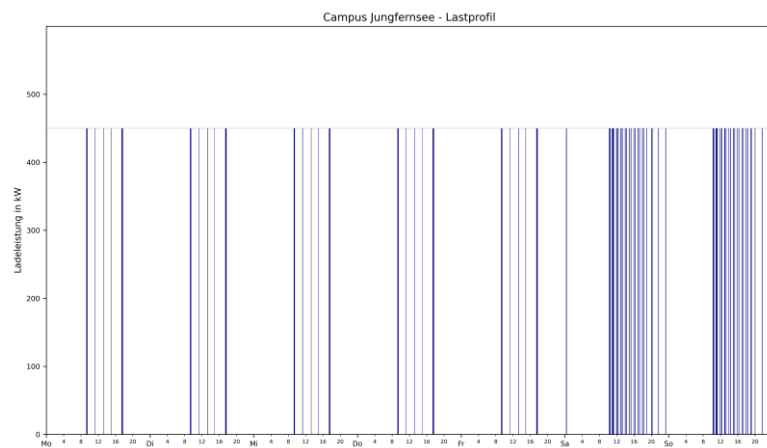
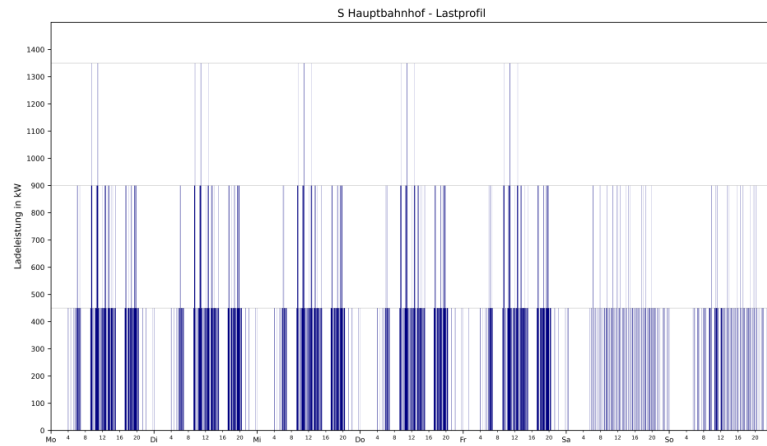
Tabelle 26 zeigt die jährlichen Energie- und Instandhaltungskosten der betrachteten Bustypen. Die ViP bezieht Diesel aktuell zu einem Preis von ca. 1,225 €/l, die Stromkosten betragen 8,8 ct/kWh. Die Energiekosten wurden auf Basis des Verbrauchs der einzelnen Bustypen berechnet. Die Kosten für die Wartung und Instandhaltung (W&I) der Ladeinfrastruktur betragen 2 % der Investitionskosten.

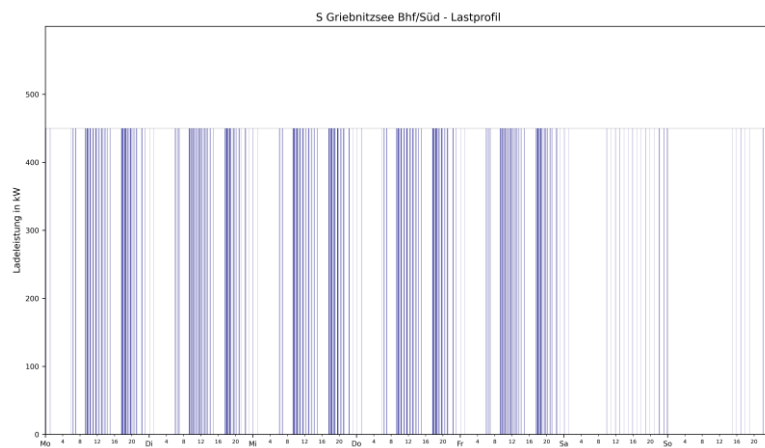
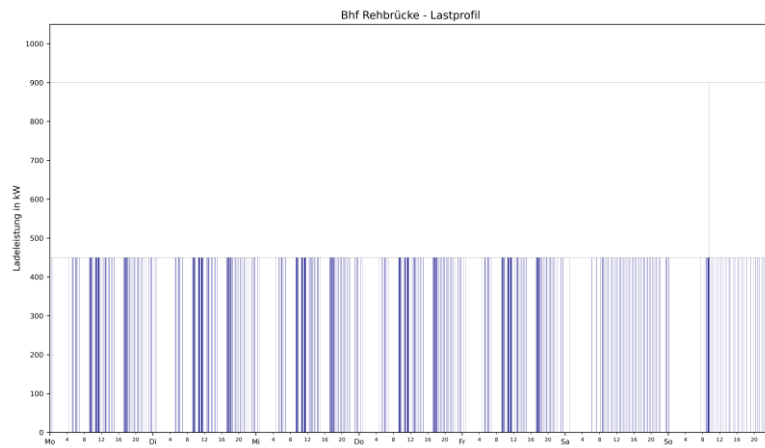
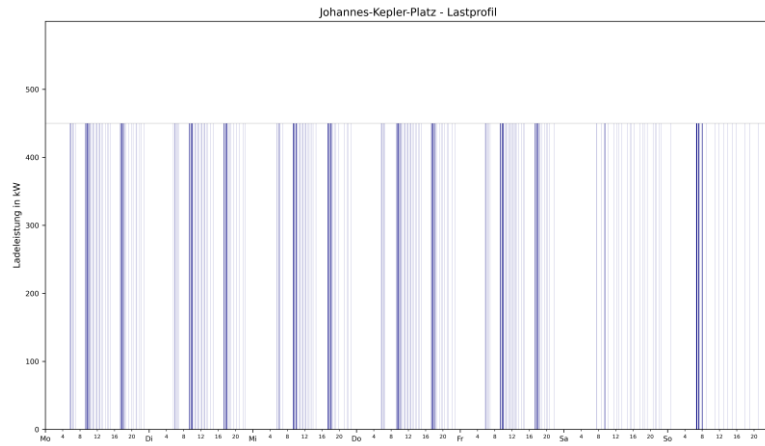
Tabelle 26: Energie- und Instandhaltungskosten einzelner Bustypen

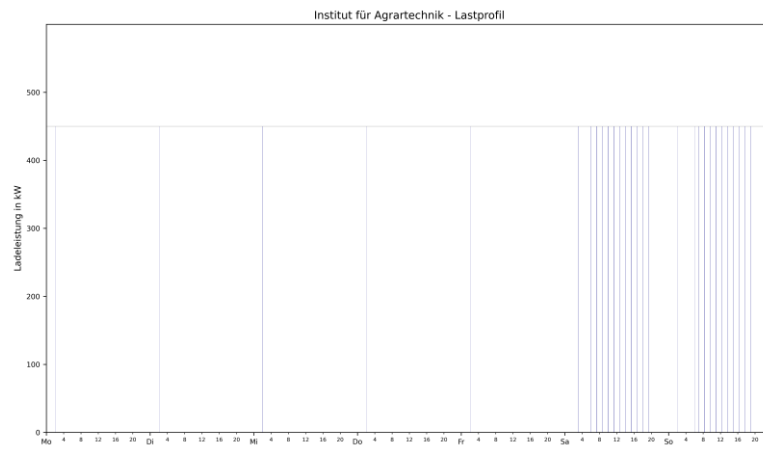
Bustyp	Fahrleistung je Jahr [km]	Verbrauch pro km	Energiekosten [€/km]	W&I Kosten [€/km]	Energiekosten je Jahr [€]	W&I Kosten je Jahr [€]
SB-Diesel	67.264	0,42 l	0,51 €	0,28 €	34.607,48 €	18.834,00 €
GB-Diesel	75.086	0,55 l	0,67 €	0,35 €	50.589,00 €	26.280,00 €
SB-DL	51.621	1,0 kWh	0,09 €	0,24 €	4.542,69 €	12.389,14 €
SB-GL	82.907	1,0 kWh	0,09 €	0,24 €	7.295,83 €	19.897,71 €
GB-DL	59.443	1,8 kWh	0,16 €	0,30 €	9.415,75 €	17.832,86 €
GB-GL	90.729	1,8 kWh	0,16 €	0,30 €	14.371,41 €	27.218,57 €

7.8 Lastprofile an den Endhaltestellen

Im Folgenden werden alle Lastprofile an den Endhaltestellen dargestellt.














7.9 Positionierung der Ladestationen an ausgewählten Endhaltestellen

Bahnhof Rehbrücke

Am Bahnhof Rehbrücke werden zwei Ladestationen in den Wendeschleifen der Busse installiert. Um eine ausreichende Positionierungsgenauigkeit unter dem Lademast zu erreichen, müssen die Wendeschleifen so umgebaut werden, dass die Ladestationen außerhalb des Kurvenbereiches angefahren werden können.

<p>Johannes-Kepler-Platz</p>	 
<p>S-Bahnhof Griebnitzsee</p>	 
<p>Campus Jungfernsee</p>	  

Alt-Golm



Um das Anfahren der Ladestation im Kurvenbereich zu vermeiden, ist es ratsam den Lademast in dem geraden Abschnitt am Ende des Haltestellenbereichs zu errichten. Der Wartebereich für die Fahrgäste mit dem Wartehäuschens sollte entsprechend ebenfalls an das Ende des Haltestellenbereiches verlegt werden.

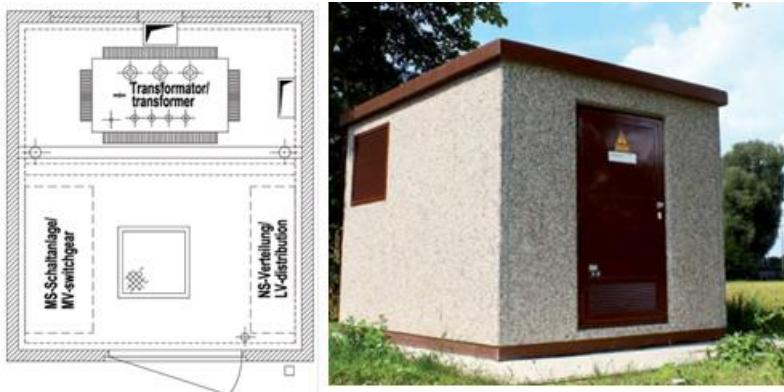


Abbildung 21: Grundriss und Außenansicht einer begehbaren Trafostation [33]

7.10 Schulungsumfang für Arbeiten an HV-Systemen

Die folgende Abbildung veranschaulicht die möglichen Schulungen für Arbeiten an HV-Systemen mit den daraus resultierenden Mehrkosten.

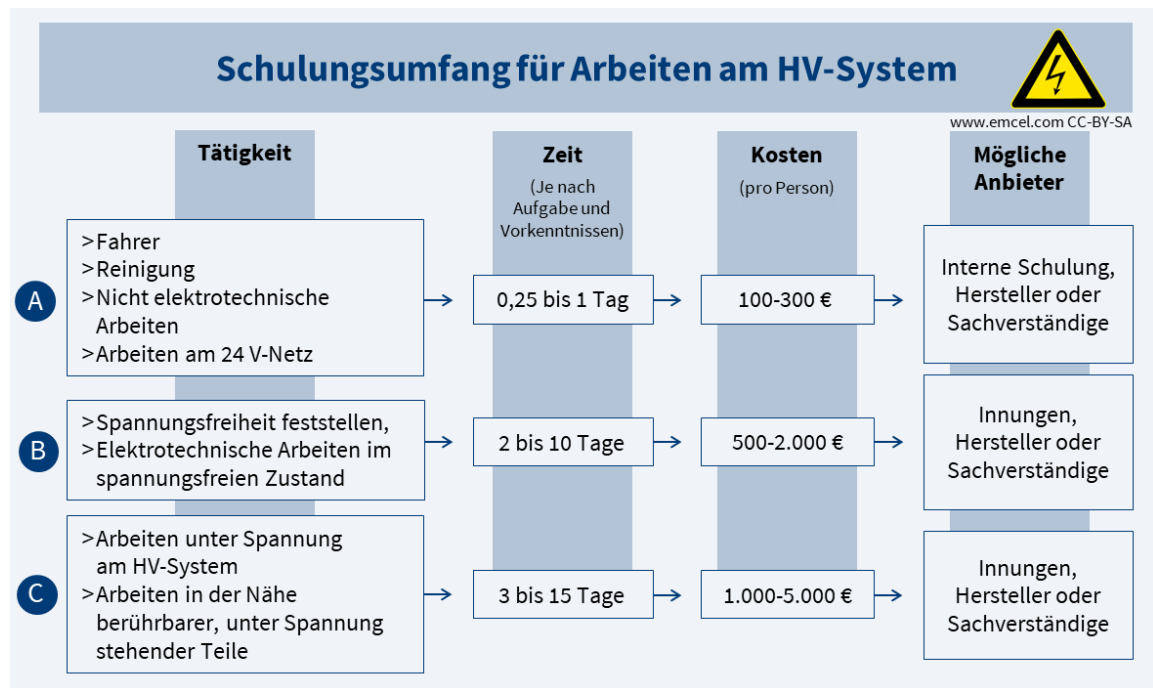


Abbildung 22: Schulungsbedarf für Arbeiten am HV-System

7.11 Wasserstoffinfrastruktur

7.11.1 Wasserstoffinfrastruktur im Depot

Für den Fall, dass neben batterieelektrischen Bussen auch Brennstoffzellenbusse eingesetzt werden sollen, wird nachfolgend die nötige Infrastruktur im Depot dargestellt. Die angegebenen Kosten beziehen sich dabei auf eine Infrastruktur für ca. 10 Busse.

Für die Versorgung von Brennstoffzellenfahrzeugen wird eine Wasserstofftankstelle benötigt. Für die H₂-Infrastruktur sind verschiedene Betreibermodelle möglich:

- Nutzung einer öffentlichen Tankstelle
- Errichtung einer eigenen Tankstelle

Die Nutzung einer öffentlichen Tankstelle stellt ein erhöhtes Risiko, bedingt durch den Fremdbetrieb der Tankstelle, dar. Falls somit Wasserstoffbusse angeschafft werden, wird vor diesem Hintergrund empfohlen, eine eigene H₂-Tankstelle, ggf. zusammen mit dem Stadtwerkeverbund, zu errichten und zu betreiben.

Unabhängig vom Betreiberkonzept erfolgt die Versorgung der Tankstelle typischerweise über Trailerbelieferung. Wasserstoff kann aber auch direkt am Standort per Elektrolyse erzeugt oder per Pipeline geliefert werden. Abbildung 23 zeigt die typischen Komponenten und das Verfahrensschema einer H₂-Tankstelle am Beispiel Trailerbelieferung und On-Site-Elektrolyse. Der Wasserstoff wird dabei zuerst in einem Niederdruckspeicher zwischengelagert und anschließend über einen Kompressor verdichtet. Das Druckniveau der Betankung für Busse beträgt üblicherweise 350 bar.

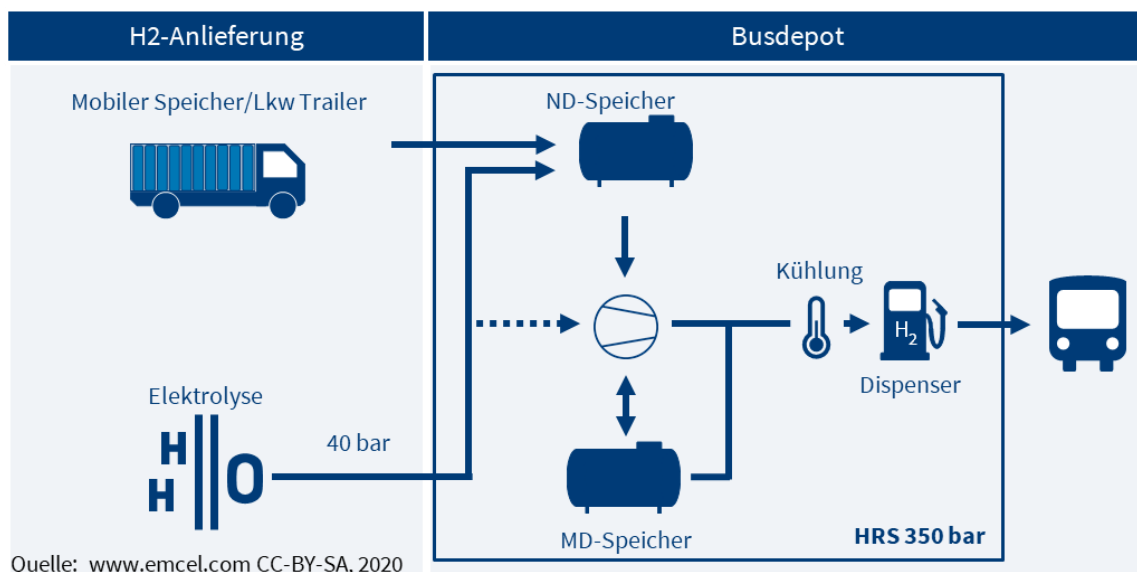


Abbildung 23: Verfahrensschema H₂-Tankstelle mit Trailerbelieferung und Elektrolyse

Zur Errichtung einer Tankstelle im Depot muss das Grundstück erschlossen und mit Schutzmaßnahmen ausgestattet werden. Die Errichtung erfordert zudem Planungsleistungen, einen Architekten sowie Gutachter, Genehmigungen und Kontakt mit der zugelassenen Überwachungsstelle (ZÜS). Tabelle 27 stellt eine exemplarische Auslegung am Standort dar. Eine solche Tankstelle für ca. 10 Busse würde etwa 1,5 bis 2,3 Mio. € kosten. Im Falle der Wasserstoffherzeugung per Elektrolyseur würden zusätzliche Kosten von 1 bis 1,5 Mio. € entstehen.

Tabelle 27: Auslegung der H₂-Tankstelle

Anforderungsliste für die Tankstelle

Anzahl Busse zzgl. Reservebusse mit geringer Fahrleistung (ca. + 15 %)	7
Anzahl Zapfsäulen	Mind. 1 Zapfsäule, evtl. 2 Zapfsäulen (Redundanz, Betriebssicherheit)
H₂ Lagermenge vor Ort	mind. 1-1,2 tH ₂
Platzbedarf Tankstelle	750 m ² ± 30 % [34]
Platzbedarf Tankstelle + Elektrolyseur	900 m ² ± 30 % [34]
Anschlussleistung	ca. 500 kW (Tankstelle), ggf. + 1 MW (Elektrolyseur)
Kosten der Tankstelle	ca. 1,5 bis 2,3 Mio. € ²⁴
Kosten Elektrolyseur	ca. 1,0 bis 1,5 Mio. € ²⁴

Das Flächenlayout der Tankstellenkomponenten ist individuell anpassbar. Aus Platzgründen ist ein effizientes Layout empfehlenswert (wie z.B. mobile H₂-Speicher, Brandschutzwände zur Reduzierung von Schutz- und Sicherheitsabständen, etc.). Flächenlayout und -bedarf sind darüber hinaus abhängig vom Tankstellen-Hersteller. Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der H₂-Infrastruktur, wird empfohlen Kooperationen mit kommunalen Partnern, wie bspw. dem Stadtwerkeverbund einzugehen. So ist es möglich, die Auslastung der Tankstelle zu optimieren.

7.11.2 Anpassungsbedarf für Personal und Werkstatt

Die Einführung von Brennstoffzellenbussen erfordert Anpassungen für Personal und Betriebshof für die Anforderungen der H₂-Technologie.

Anpassungsbedarf bei Wasserstoff-Systemen

Für Arbeiten am Wasserstoffsystem werden üblicherweise Arbeitsbereiche speziell ertüchtigt. Zur Ermittlung der spezifischen Maßnahmen ist eine Gefährdungsbeurteilung durchzuführen. Die Tätigkeiten am H₂-System, für die es einer Schulung bedarf, können wiederum in drei Kategorien unterteilt werden:

²⁴ Eigene Angabe EMCEL

1. Schulung des Fahr- und Reinigungspersonals sowie allgemeine mechanische und elektrische Arbeiten, die nicht am H₂-System stattfinden.
2. Wartung und Reparatur des Wasserstoffsystems (Tanksystem und Brennstoffzelle).
3. Grundlegende Arbeiten, wie Ein- oder Umbau der Gasanlage.

Werkstattausrüstung und Werkzeug

Neben der HV-Technologie wird beim Betrieb von Brennstoffzellenbussen auch Anpassungsbedarf hinsichtlich H₂-Technologie notwendig. Abbildung 24 zeigt daher mögliche Anpassungen der Werkstatt und des Depots mit zugehöriger Kostenschätzung.

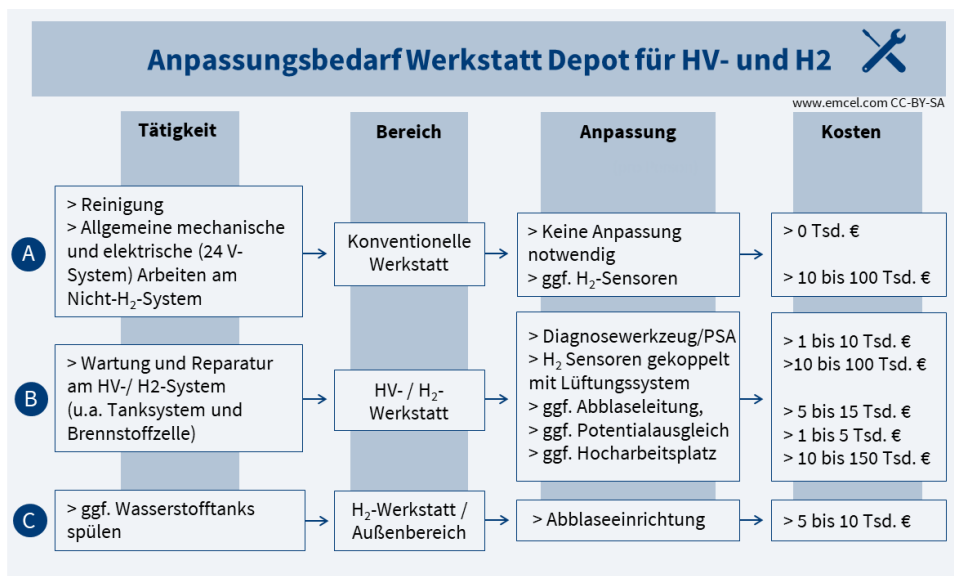


Abbildung 24: Anpassungsbedarf der Werkstatt für Hochvolt- und H₂-Technologie

Tabelle 28 stellt mögliche Kosten der Ertüchtigung der aktuellen Werkstatthalle für nicht-konventionelle Arbeiten an BZ-Bussen dar. Unter der Annahme der Ertüchtigung von 3 Buspositionen ergeben sich Werkstattkosten von etwa 765.000 €.

Tabelle 28: Kostenschätzung Werkstatteertüchtigung Brennstoffzellenbusse ²⁵

Ertüchtigung	Kostenschätzung
Wartungsgerüst für Dacharbeitsplätze	ca. 200.000 € pro Busposition
H ₂ -Sensorik und Sicherheitseinrichtungen	ca. 25.000 € pro Busposition
Werkzeugbeschaffung	ca. 15.000 € pro Busposition
Ableitfähiger Boden	ca. 15.000 € pro Busposition

²⁵ Eigene Angabe EMCEL

7.11.3 Schulungsumfang für Arbeiten an H₂-Systemen

Die folgende Abbildung veranschaulicht die möglichen Schulungen für Arbeiten an H₂-Systemen mit den daraus resultierenden Mehrkosten.

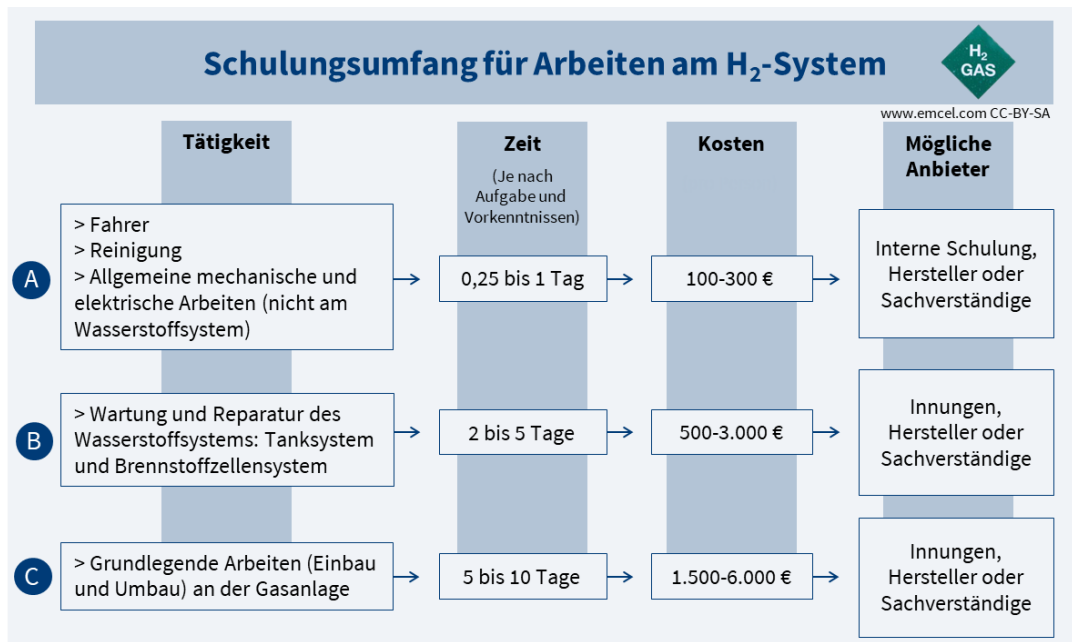


Abbildung 25: Schulungsbedarf für Arbeiten am H₂-System

7.12 Busvorlauf Krampnitz

Nachfolgend ist angegeben, welche Umläufe der ersten Ausbaustufe sowie der Endausbaustufe den Einsatz von Depotladern erlauben.

Tabelle 29: Krampnitz - Tauglichkeit von Depotladern für erste Ausbaustufe

Strecke	SB mit 380 kWh	GB mit 490 kWh	SB mit 474 kWh	GB mit 640 kWh
MQB-FUP-CJS		×		✓
PRO-FUP-CJS		×		×
FUP-CJS		×		×
KRW-CJS		×		✓
RSP-GGK-CJS		×		×
RSP-CJS		×		×
NA-KA	×		×	

Tabelle 30: Krampnitz - Tauglichkeit von Depotladern für Endausbaustufe

Strecke	SB mit 380 kWh	GB mit 490 kWh	SB mit 474 kWh	GB mit 640 kWh
MQB-KRW-RSP		×		×
PRO-FSH	×		×	
RSP-GGK-KRW		×		×
RSP-KRW-MQB		×		×
NA-KRO	×		×	