

Dokumentation

zur „Machbarkeitsstudie zu alternativen
Antrieben der Busflotte im Betriebsgebiet der
Kasseler Verkehrs-Gesellschaft Aktiengesellschaft (KVG)“

Erstellt von:

eebc European Electrical Bus Company GmbH

Bessie-Coleman-Straße 7

60549 Frankfurt am Main

Auftraggeber:

Kasseler Verkehrs-Gesellschaft Aktiengesellschaft (KVG)

Königstor 3-13

34117 Kassel

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Version:

Version 1.1

erstellt am 21.03.2024

Inhalt

INHALT	I
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	1
I EINLEITUNG	3
II UMSETZUNG UND ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG	7
1 AP 1: Machbarkeitsanalyse	7
1.1 AP1.1 Bestandsaufnahme der Depothallen und vorhandenen Fahrzeugflotte unter Berücksichtigung der CVD-Richtlinie	7
1.2 AP 1.2 Definition von Referenzszenarien auf Basis der vorliegenden Infrastruktur, Depothallen und Fahrzeugstand	7
1.3 AP 1.3 SOLL/ IST-Vergleich repräsentativer Umläufe	8
1.4 AP 1.4 Strecken- und Einsatzanalyse der alternativen Bussysteme	8
1.4.1 Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)	9
1.4.2 Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)	15
1.4.3 Umlaufverknüpfung	16
1.4.4 Interpretation der Ergebnisse	19
1.5 AP 1.5 Konfiguration des Fahrzeugsystems hinsichtlich der Optimierung des Energieverbrauchs..	19
1.5.1 Optimierung der Fahrzeuge	19
1.5.2 Technische Entwicklung Traktionsbatterie	20
1.5.3 Umlaufanpassung.....	21
1.5.4 Schnellladung an ausgewählten Wendestellen	26
1.5.5 Vergleich der Alternativen.....	30
1.6 AP 1.6 Erstellung eines Umlaufkonzepts auf Basis der Bewertungen der bestehenden Umläufe ...	39
1.7 AP 1.7 Bewertung der Konzeptionsanalysen und Erstellung eines neuen Umlaufplans für ein exemplarisches Verkehrsmodell	40
1.7.1 Übersicht der Einsatzpotenziale	41
1.7.2 Erläuterung der Grafiken.....	42
1.7.3 Umsetzung Stufe 1 (+3 Schnelllader ggü. Stufe 0).....	43
1.7.4 Umsetzung Stufe 2 (+5 Schnelllader ggü. Stufe 0).....	45
1.7.5 Umsetzung der abschließenden Umlaufanpassung	46
1.7.6 Umlaufanpassung.....	47
1.8 AP 1.8 Ermittlung einer möglichen Lade- und Tankinfrastruktur	50
1.8.1 Schnellladeinfrastruktur an Wendestellen	50
1.8.2 Depotladeinfrastruktur.....	53
1.9 AP 1.9 Analyse zur möglichen Energiebereitstellung, Konfiguration von Ladestationen sowie Möglichkeiten zur Betankung mit Wasserstoff	58
1.10 AP 1.10 Erstellung eines Tank- und Lademanagementsystems für Fahrzeug und Ladepunkte	61
2 AP 2 Unterstützung zur Überholung von IT-Systemen	67
2.1 AP 2.1 Konzeption einer IT-Systemarchitektur	67
2.2 AP 2.2 Strategieentwicklung zur Anschaffung neuer Software	71
3 AP 3 Auswirkung der Umstellung auf Betrieb und Umwelt.....	72
3.1 AP 3.1 Gesamtkosten und Umweltkosten	72

3.1.1	Investitionen.....	72
3.1.2	CO ₂ Emissionen	72
3.1.3	Umweltkosten	74
3.2	AP 3.2 Migrationspfade und ökologischer Nutzen	77
3.3	AP 3.3 Kommerzielle Analyse über Umstellungszeitraum	78
3.3.1	Methodik	78
3.3.2	Prämissen	79
3.3.3	Kommerzielle Analyse	83
3.3.4	Investitionsübersicht 2023 - 2030 pro Jahr	88
4	Fazit	91
4.1	Technisches Fazit	91
4.2	Kommerzielles Fazit	93
4.3	Gesamtfazit	94

Abkürzungsverzeichnis

<i>Abkürzung</i>	<i>Bedeutung</i>
AC	Wechselspannung / Wechselstrom
AP	Arbeitspaket
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (engl.: Battery Electric Vehicle)
BHMS	Betriebshofmanagementsystem
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Verbraucherschutz
BZ	Brennstoffzelle
CCS	Combined Charging System – Ladesystem für Fahrzeuge
CNG	Komprimiertes Erdgas (von engl. Compressed Natural Gas)
CP	Control Pilot (Kontakt)
CPO	Charge Point Operator
CVD	Clean Vehicles Directive (Richtlinie (EU) 2019/1161 bzw. 2009/33/EG)
DC	Gleichspannung / Gleichstrom
E-Bus	Elektrobus
eebc	eebc European Electrical Bus Company GmbH
EU	Europäische Union
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (engl.: Fuel Cell Electric Vehicle)
FIFO	First-in-First-Out
FK	Fremdkapital
Fzg	Fahrzeug
HGB	Handelsgesetzbuch
HVAC	Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (engl. Heating, Ventilation and Air Conditioning; HVAC)
ID	Identifikation / Identifikationsnummer
IT	Informationstechnik
ITCS	Betriebsleitsystem (von engl. Intermodal Transport Control System)

LB	Linienbündel
LFP	Lithium-Eisenphosphat
Li-Ion(en)	Lithium-Ionen
LIS	Ladeinfrastruktur
LMP	Lithium Metall Polymer
LNG	Flüssigerdgas (von engl. Liquefied Natural Gas)
LP	Ladepunkt
LPG	Flüssiggas oder Autogas (von engl. Liquefied Petroleum Gas)
LTO	Lithium Titanium Oxid
MA	Mitarbeiter
Max	Maximal
Min	Minimal
MS	Mittelspannung (Spannungen > 1.000 V AC)
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid
NS	Niederspannung (Spannungen < 1.000 V AC)
OCPP	Open Charge Point Protocol
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PV	Photovoltaik
REX	Range Extender
RFID	Radio-Frequency Identification
SaubFahrzeugBeschG	Saubere-Fahrzeug-Beschaffungs-Gesetz
SOC	State of Charge – Ladestand (Traktionsbatterie)
ÜNL	Übernachtladung
ZL	Zwischenladen

Einheiten werden im Dokument entsprechend dem Internationalen Einheitensystem angeführt („SI-Einheiten“) und sind nicht als Abkürzung separat aufgeführt.

I Einleitung

Die Kasseler Verkehrs-Gesellschaft Aktiengesellschaft (KVG) ist als Teil der Unternehmensholding der Stadt Kassel und der Kasseler Verkehrs- und Versorgungs-GmbH (KVV) für den Betrieb von Straßenbahn- und Buslinien sowie für Bau und Unterhaltung von Infrastruktureinrichtungen für den ÖPNV in Kassel und der umliegenden Region verantwortlich.

Als lokaler Aufgabenträger des ÖPNV steht die KVG vor der Herausforderung die Anforderungen aus der sogenannten Clean Vehicles Directive (CVD) bzw. dem Saubere-Fahrzeuge-Beschaffungs-Gesetz (SaubFahrzeugBeschG) zu erfüllen. Damit sind feste Quotenregelungen für die Beschaffung von als sauber oder emissionsfrei eingestuften Fahrzeugen definiert, die bis Ende 2025 bzw. zum Ende der Folgeperiode in 2030 erfüllt werden müssen. Die KVG begegnet diesen Anforderungen im Rahmen des Projekts „Klimafreundliche Busse durch alternative Antriebe“, wobei aktuell bereits eine erste Teilflotte von 12 Batteriebusen im Rahmen des Projekts „MEKS – Mobilitäts- und Energiewende mit Elektrobussen in Kassel“ eingesetzt wird.

Im Fokus der Untersuchung steht die Erarbeitung eines belastbaren Umstellungskonzeptes auf alternative Antriebe, das als Grundlage für eine Umstellungsstrategie der KVG angewendet werden kann. Neben technischen Aspekten sollen insbesondere auch die Wirtschaftlichkeit und der ökologische Nutzen im Fokus der Untersuchung stehen.

Die Stadtverordnetenversammlung Kassel hat den Antrag "Der Klimakrise entschieden begegnen" am 26. August 2019 beschlossen. Darin heißt es zur Energie und Mobilitätswende "Dafür benötigt es sofortige Maßnahmen, die zu einer nachhaltigen und messbaren Reduktion der CO₂-Emissionen führen." und "Das ambitionierte Ziel ist der Versuch bis 2030 klimaneutral zu werden. Jede Entscheidung der kommunalen Selbstverwaltung wird künftig auf diese Zielerreichung hin überprüft."

Vorstudien

Im Rahmen des MEKS-Projekts wurde bereits eine Machbarkeitsstudie angefertigt, bei der die betreffenden Umläufe und Einsatzgebiete der zwölf Elektrobusse isoliert und im Detail untersucht wurden (2021, eebc im Auftrag für Kasseler Verkehrs- und Versorgungs-GmbH). Das Projekt befindet sich aktuell in der Realisierungsphase und wird dabei von eebc begleitet.

Die hier vorliegende Untersuchung setzt den Fokus auf das gesamte Betriebsgebiet der Kasseler Verkehrs-Gesellschaft Aktiengesellschaft (KVG). Ziel der Untersuchung 2021 war die Findung eines gut geeigneten Einsatzrahmens für die bereits festgelegte Anzahl von zwölf batterieelektrischen Fahrzeugen. Hier ist die Zielsetzung darauf ausgerichtet, die Gesamtflotte bis 2030 vollständig zu dekarbonisieren.

Die vorliegende Untersuchung erfolgt vollständig technologieoffen. Da 2021 die Technologie bereits vorgegeben war, werden die aktuellen Umläufe vollständig in die Bewertung aufgenommen. Dies impliziert auch die angestrebten „MEKS-Umläufe“. Eine abweichende Technologieempfehlung für diese Umläufe von der bereits gewählten Technologie wurde nicht ausgeschlossen. Im Vorgriff auf die weitere Dokumentation kann bereits hier angeführt werden, dass keine Gründe vorliegen, die eine Änderung der Elektrifizierung im MEKS-Projekt rechtfertigen.

Verbrauchsparameter wurden auf Basis der Streckensimulationen im Jahr 2021 für diese Studie übernommen (z.B. Verbrauchswert in kWh/km für BEV auf verschiedenen Kasseler Linien).

In späteren Untersuchungsabschnitten wird die Umsetzung des MEKS-Projekts als gesetzt berücksichtigt. Die Einführung der „MEKS-Busse“ wird als erste Ausbaustufe der Dekarbonisierung der KVG-Flotte interpretiert.

Neubau der Betriebshofanlage

Die KVG Kassel plant die Neugestaltung des Betriebshofs in der Sandershäuser Straße 23. Der Planungsprozess erfolgt soweit möglich unter der Berücksichtigung der während der Untersuchung vorgestellten Ergebnisse. Der aktuelle Planungsstand des Betriebshofneubaus kann nicht als Grundlage für diese Studie beigelegt werden. Entsprechend sind die Abschnitte mit Bezug auf die Betriebshofertüchtigung hier teilweise theoretischer Art. Die getroffenen Aussagen und Angaben sind als Empfehlung zu verstehen, die im Planungsprozess Einzug erhalten können. Fokus liegt hier insbesondere auf einer langfristigen Perspektive, um die Infrastruktur anpassbar für die zu erwartende technische Entwicklung zu gestalten.

Relevante Antriebstechnologien

Die hier zu untersuchenden Antriebstechnologien müssen die Anforderung der Clean Vehicle Directive (CVD), beziehungsweise des entsprechenden Bundesgesetzes über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge (SaubFahrzeugBeschG)¹, für emissionsfreie Antriebe erfüllen. Zusätzlich sollen die Antriebstechnologien marktverfügbar sein.

Diese Anforderungen werden aktuell nur von elektrischen Antriebskonzepten erfüllt, die gänzlich ohne eine Verbrennungskraftmaschine auskommen. Praktisch ist der Betrachtungsumfang damit auf Elektrofahrzeuge beschränkt. Da auch Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) auf einem elektrischen Antriebsstrang basieren, fallen sowohl batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) als auch FCEV unter diese Definition.

Im Folgenden werden zwei Techniken, Oberleitungsbus und Wasserstoffverbrennungsmotor, detaillierter diskutiert. Auch wenn diese teilweise theoretisch geeignet wären, sind diese nicht Teil des Untersuchungsumfanges.

Oberleitungsbusse sind Elektrobusse, die im Betrieb an das Oberleitungsnetz als Energiequelle angebunden sind. Diese Fahrzeuge werden aufgrund der nachgezogenen Stromabnehmer auch als Trolleybusse bezeichnet. Moderne Varianten mit Lithium-Ionen Traktionsbatterien erlauben dabei ca. 30 – 50 % der Fahrstrecke im oberleitungsfreien Betrieb. Im Oberleitungsbetrieb kann der Antriebsstrang direkt aus dem Oberleitungsnetz versorgt werden, während gleichzeitig die Batterie an Bord nachgeladen wird. Dieser Umstand ermöglicht bei adäquater Systemauslegung eine theoretisch unendliche Reichweite, da Energie während der Fahrt zugeführt wird. Zusätzlich sind großvolumige Fahrzeuge (Doppelgelenkfahrzeuge) in diesem Systemansatz darstellbar. Im elektrischen Antriebsstrang können Mehrachsantriebe ohne aufwendige Mechaniken realisiert werden. Aufgrund des Oberleitungsnetzes kann gleichzeitig die Traktionsbatterie klein dimensioniert werden.

Wegen der großen möglichen Passagierbeförderungskapazität werden Trolleybusse häufig ‚zwischen‘ Bus-ÖPNV und Straßenbahnen angesiedelt. Diese Einordnung ist auch im

¹ Die Quotenvorgaben zur Beschaffung sauberer und emissionsfreier Fahrzeuge sind in CVD und SaubFahrzeugBeschG identisch.

wirtschaftlichen Kontext tragbar. Die Systemkosten eines Trolleybussystems rangieren ebenfalls zwischen den beiden Alternativen. Die Nachrüstung von Oberleitungen ist sehr kostenintensiv und im Detail abhängig vom Bauaufwand². Auch die Beschaffungskosten der Fahrzeuge liegen deutlich über den in der Studie behandelten Antriebsvarianten, was primär auf die erforderliche doppelte Isolierung der Fahrzeuge zurückzuführen ist. Industriestandardkomponenten für Elektrofahrzeuge sind einfach isoliert ausgeführt. Entsprechend werden vielfach Kleinserienprodukte eingesetzt, was sich preislich niederschlägt. Darüber hinaus sind nur wenige Anbieter am Markt vertreten, die eine für den hiesigen Absatzmarkt passende Produktqualität anbieten.

Vorhandene Straßenbahnoberleitungen sind für Trolleybusse nicht direkt nutzbar. Straßenbahnsysteme nutzen das geerdete Schienensystem als Massepotenzial (interpretierbar als „Minuspole“), so dass nur eine einzige Oberleitung mit positivem Potenzial erforderlich ist. Bereifte Fahrzeuge können den Stromkreis nicht über die Fahrbahn abführen, so dass eine zweite Oberleitung mit Masse- oder Erdpotenzial bereitgestellt werden muss. Grundsätzlich sind Straßenbahn-umspannwerke als Anbindungsoption für Trolleybus-Oberleitungen nutzbar. Dies gilt jedoch nur, wenn entsprechende Versorgungskapazitäten im Netz verfügbar sind. Im Allgemeinen sind Straßenbahnunterwerke nicht ausreichend überdimensioniert, um parallel eine Busflotte zu versorgen.

In Summe ist der Trolleybus technisch ideal für die Dekarbonisierung des Bus-ÖPNVs geeignet. Lange Fahreichweiten und hohe Transportkapazitäten sind deutliche Pro-Argumente, denen der Kostenfaktor als Contra-Argument gegenübersteht. Aufgrund dessen ist die Hürde für eine Systemeinführung sehr hoch. Die Systemeinführung ist nur sinnvoll, wenn neben der Dekarbonisierung auch eine Steigerung des Personentransports als Anforderung gestellt wird. Dies betrifft im allgemeinen Städte und Gemeinden, die kein Straßenbahnsystem einsetzen und gleichzeitig Transportanforderungen gegenüberstehen, die mit einem Bus-ÖPNV nicht oder nur mit hohem Aufwand erbracht werden können. Dies zeigt sich nicht zuletzt daran, dass Trolleybusse herstellerseitig auch als „Straßenbahn auf Rädern“ beworben werden.

Für den Anwendungsfall können Trolleybusse aus dem Untersuchungsumfang gestrichen werden, da in Kassel bereits ein Straßenbahnsystem für die Bewältigung zentraler Transportströme eingesetzt wird. Im Fokus steht hier der Ersatz des Bus-ÖPNVs mit einer dekarbonisierten Variante, ohne die Transportkapazitäten deutlich zu steigern.

Wasserstoffverbrennungsmotoren existieren bereits seit Anfang des 19. Jahrhunderts. Auch aufgrund der hohen Flüchtigkeit von Wasserstoff konnten sich derartige Konzepte bisher nicht durchsetzen. Moderne Fertigungs- und Produkttechnologien versprechen hier eine Änderung. Aktuell werden Wasserstoffmotoren im Kontext der Bekämpfung des Klimawandels wieder vermehrt in den Fokus gestellt. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass der Wasserstoffmotor Objekt der industriellen Forschung ist. Vorreiter der Branche befinden sich aktuell in den Phasen der Vorentwicklung, der Konzeptvalidierung oder der Serienvorbereitung für

² Im Jahr 2015 wurde bereits der Kostenaufwand für einfache Oberleitungsstrecken ohne Kreuzungen, Anknüpfungspunkte oder ähnliches, von einem Branchenkenner mit ca. 1 Mio. € pro km abgeschätzt.

Komponenten. Aufgrund des Entwicklungsstandes liegt keine ausreichende Datenbasis vor, um den Wasserstoffverbrennungsmotor im Rahmen dieser Untersuchung einzubinden.³

Darüber hinaus ist es aktuell unklar, ob Wasserstoffmotoren im Rahmen der CVD als emissionsfrei klassifiziert werden. Auch wenn die Verbrennung von Wasserstoff weitestgehend emissionsfrei erfolgt, werden Stickoxide freigesetzt. Darüber hinaus erfordert der Verbrennungsmotor den Einsatz von Schmiermitteln, die sich in der Emissionsbilanz als kohlenstoffhaltige Emissionen niederschlagen. Für die Klassifizierung, beziehungsweise eine Einschätzung, fehlen aktuell Messdaten aus der Praxis. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Wasserstoffverbrennungsmotoren mindestens die Anforderungen an ein „sauberes“ Fahrzeug erfüllen, was nicht Teil dieser Untersuchung ist. Unabhängig davon muss die Betrachtung hier aufgrund des Entwicklungsstandes ausgeschlossen werden.

³ Vgl. Schrank, Michael; Langer, Vivien; Jacobsen, Benjamin: Wasserstoff-Verbrennungsmotor als alternativer Antrieb (Metastudie), in: now-gmbh.de.de, 2021, https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/10/NOW_Metastudie_Wasserstoff-Verbrennungsmotor.pdf/ (abgerufen am 14.02.2024)

II Umsetzung und Ergebnisse der Untersuchung

1 AP 1: Machbarkeitsanalyse

1.1 AP1.1 Bestandsaufnahme der Depothallen und vorhandenen Fahrzeugflotte unter Berücksichtigung der CVD-Richtlinie

Im Rahmen von Arbeitspaket (AP) 1.1 wird die Erfassung der erforderlichen Daten für die Ausführung der Machbarkeitsstudie angesiedelt. Sofern diesbezüglich eine Dokumentation erforderlich ist, erfolgt diese im dazugehörigen Themenkomplex im Verlauf des Berichts.

1.2 AP 1.2 Definition von Referenzszenarien auf Basis der vorliegenden Infrastruktur, Depothallen und Fahrzeugstand

Mithilfe der eingesetzten Analyse- und Auswertungstools können wir die Gesamtzahl der aktuellen Umläufe in den folgenden Arbeitspaketen verarbeiten und auswerten. Eine Ableitung verallgemeinerter Referenzszenarien oder Referenzumläufe ist nicht erforderlich.

Über den gewählten Ansatz kann die Bearbeitungsgenauigkeit erhöht werden, indem eine umlaufscharfe Betrachtung vollzogen wird.

Die KVG steht aktuell bereits an der Schwelle zur Einführung von Elektromobilität im Bus-ÖPNV. Im Rahmen des Projektes „MEKS- Mobilitäts- und Energiewende mit Elektrobussen in Kassel“ werden bereits batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) in den Betrieb eingeführt. Im Fokus stehen dabei zwölf Busse (4 x 12 m Solobus und 8 x 18 m Gelenkbus), die mit Pantographen Schnittstellen ausgerüstet werden. Die eingesetzte Energiebatterie ermöglicht dennoch hohe Reichweiten ohne hochfrequentes Zwischenladen. Die Kombination einer großen Speicherkapazität mit einer leistungsfähigen Ladeschnittstelle ermöglicht es die Fahrzeuge auf den anspruchsvollen Umläufen der Linie 11 einzusetzen.

2021 wurde eine Machbarkeitsstudie⁴ für das MEKS-Projekt ausgeführt, wobei ein geeigneter Einsatzrahmen für die bereits festgelegte Ausführung der Antriebstopologie („Energiebatterie mit möglichem Pantographen“) definiert werden sollte. Im MEKS-Projekt wurde die Antriebstechnik bereits festgelegt. Die vorliegende Untersuchung erfolgt technologieoffen. Auch wenn die entsprechenden Fahrzeuge zum Zeitpunkt der Datenerhebung noch nicht „auf der Straße“ eingesetzt werden, müssen diese als erste Ausbaustufe der Flottendekarbonisierung berücksichtigt werden. Um beiden Aspekten gerecht werden zu können, wird eine duale Herangehensweise für das MEKS-Projekt verfolgt.

- Für die Herleitung einer Vorzugstechnologie wird die feststehende Technikauswahl der MEKS-Busse in den Hintergrund gestellt. Sofern Indikatoren erkennbar sind, die gegen

⁴ „Einführung Elektrobussystem in Kassel“ (eebc, 2021) im Auftrag der Kasseler Verkehrs- und Versorgungs-GmbH

eine Technikumsetzung der MEKS-Busse nach Plan sprechen, werden diese benannt. Eine Lösung mit zwei Antriebstechniken ist für die KVG grundsätzlich denkbar. Die Technikempfehlung erfolgt unabhängig vom bereits eingeschlagenen Pfad.

- Für die weitere Detailanalyse der Flottenumstellung werden die MEKS-Busse als erste Ausbaustufe betrachtet. Abhängig von der identifizierten Vorzugstechnologie erfolgen die weiteren Ausbaustufen als direkte Folgeschritte (bei Empfehlung von BEV), als unabhängige Entwicklung (bei Empfehlung von FCEV) oder Kombination aus beiden (bei Empfehlung eines Technologie-Mixes BEV und FCEV).

1.3 AP 1.3 SOLL/ IST-Vergleich repräsentativer Umläufe

Entsprechend der Angaben im vorherigen AP erfordert die verfolgte Untersuchungsstrategie keine Beschränkung auf Referenzszenarien und repräsentative Umläufe. Stattdessen werden alle beigestellten Umläufe in den folgenden Kapiteln einem „Soll-/Ist-Vergleich“ unterzogen.

Unter dem Begriff „Soll-/Ist-Vergleich“ wird hier der Vergleich des aktuellen Status Quos mit verschiedenen Ansätzen für eine Flottendekarbonisierung aufgefasst. Als marktverfügbare Ansätze stehen batterieelektrische (BEV) und wasserstoffelektrische Antriebsvarianten (FCEV) zur Disposition. Die dazugehörige Analyse inklusive Ergebnissen und Empfehlung einer Vorzugstechnologie erfolgt in den folgenden APs 1.4 und 1.5. Dabei wird die folgende Methodik angewandt.

1.4 AP 1.4 Strecken- und Einsatzanalyse der alternativen Bussysteme

Zunächst wird der Energieverbrauch im Status Quo untersucht. Im Rahmen des MEKS-Projektes wird aktuell bereits eine 300 kW Schnellladeeinrichtung an der Haltestelle Holländische Straße für Busse mit Pantografen aufgebaut.

Im Rahmen der technologieoffenen Untersuchung wird auch untersucht, ob eine BEV-Flotte ohne die Möglichkeit der Zwischenladung sinnvoll ist. Für diesen Fall werden im ersten Schritt Fahrzeuge angenommen, die zu Gunsten einer größeren Batterie keine Pantografen verbaut haben. Entsprechend wird im ersten Schritt der Analyse vernachlässigt, dass an der Holländischen Straße eine Schnellladestation in Errichtung ist. Das Szenario kann auch als „Eins-zu-Eins“ Ersatz der aktuellen Dieselbusflotte durch emissionsfreie Alternativen verstanden werden. Es wird hier zunächst eine Batteriekapazität für Modelle ohne Pantographen angesetzt. Im Verlauf der Status Quo Untersuchung wird ebenfalls ein Modell betrachtet, bei der die Schnellladestation und die MEKS-Flotte mit Pantografen als gegeben betrachtet wird.

1.4.1 Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV)

Betrachtung ohne Schnellladung an Holländischer Straße

Einleitend wird angenommen, dass die Dekarbonisierung durch batterieelektrische Antriebe erreicht werden soll. Für die durch die KVG betriebenen Umläufe (ab Depot BSO) ergeben sich dabei die folgenden Verbrauchsgrafiken. Zunächst wird hier vernachlässigt, dass durch das MEKS-Projekt bereits die Errichtung einer Schnellladestation geplant ist. Angenommen wird hier zunächst eine vollständig elektrifizierte Flotte mit ausschließlicher Ladung im Depot.

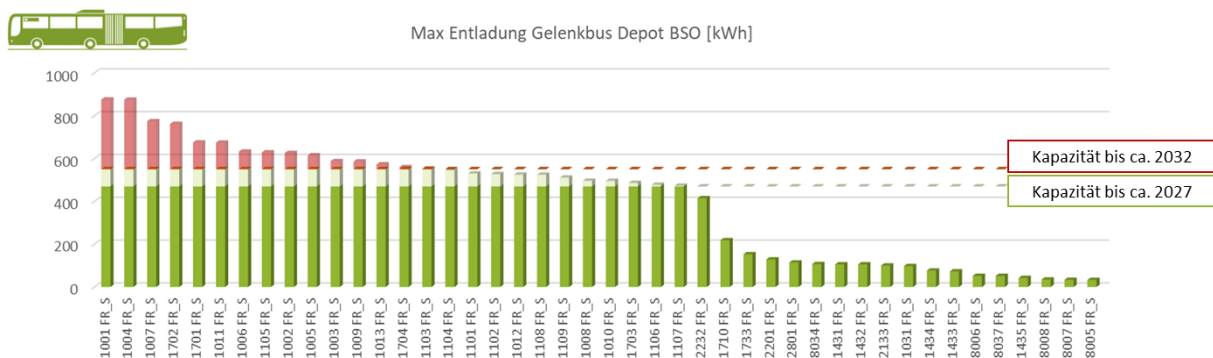


Abb. 1: Maximale Entladung pro Umlauf GL BEV ohne Pantographen ohne Schnellladung Depot BSO

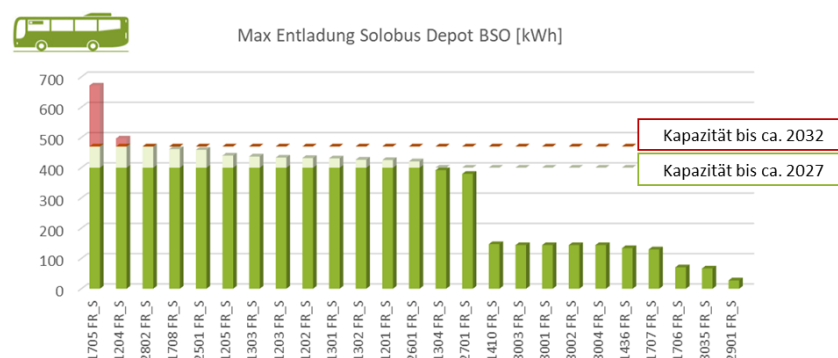


Abb. 2: Maximale Entladung pro Umlauf SL BEV ohne Pantographen ohne Schnellladung Depot BSO

In den Grafiken ist eine hohe Menge an Umläufen mit hohen Verbrauchswerten zu erkennen, die den aktuellen Kapazitätsgrenzwert nahezu erreichen und überschreiten. Darüber hinaus liegen größere Umlaufmengen mit vergleichsweise kleinem Verbrauchswert vor, die für Spitzenlastzeiten erforderlich sind. In Anlehnung an die Fahrstrecken der Umläufe werden diese im Folgenden auch als Langfahrten (hoher Verbrauchswert) und Kurzfahrten bezeichnet.

Anmerkung

Kurzfahrten mit geringem Verbrauchswert eignen sich auf technischer Ebene sehr gut für die Dekarbonisierung, da nur geringe Fahranforderungen zu erfüllen sind. Im Verlauf der Untersuchung wird der Fokus dennoch auf Langfahrten ausgerichtet. Dabei wird angenommen, dass emissionsfreie Busse für die Fahrgäste möglichst wahrnehmbar einzusetzen sind.

Zusammengefasst ergibt sich die folgende Klassifizierung der Machbarkeit.

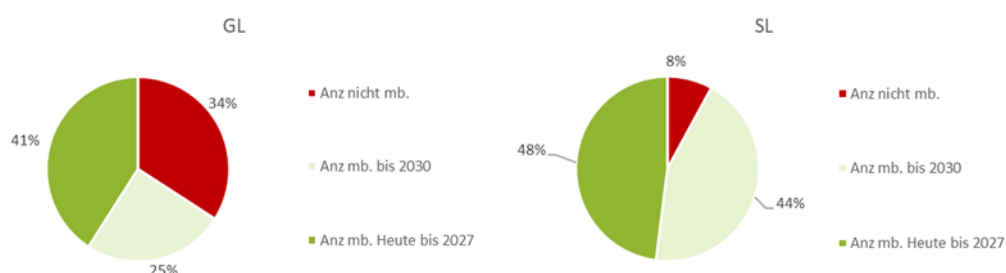


Abb. 3: Zeitpunkte Machbarkeit BEV ohne Pantographen ohne Schnellladung Depot BSO

Nahezu alle als heute machbar (mb) klassifizierten Umläufe fallen in die Gruppe der Kurzfahrten, also Einsätze zu Spitzenlastzeiten. Die Langfahrten sind zum Teil ab 2028 als machbar eingeschätzt, weisen jedoch außerdem einen nennenswerten Anteil zunächst als nicht machbar bewertete Umläufe auf. Sondermaßnahmen sind erforderlich, wenn BEV als Technikalternative eingesetzt werden sollen, um die Menge machbarer Umläufe zu steigern.

Auch wenn die fremd betriebenen Umläufe (ab Depot FVUI) nicht im Fokus der Untersuchung stehen, wurde die Energieverbrauchsanalyse ebenfalls ausgeführt. Die Ergebnisse sind im Wesentlichen vergleichbar zu den eigenständig betriebenen Umläufen.

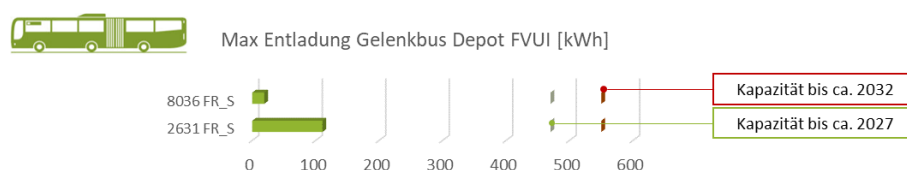


Abb. 4: Maximale Entladung pro Umlauf GL BEV ohne Pantographen ohne Schnellladung Depot FVUI

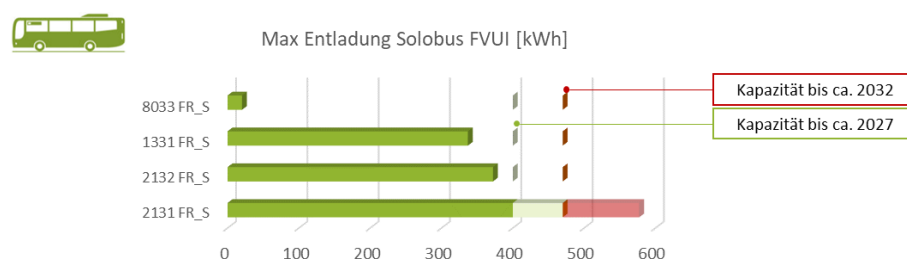


Abb. 5: Maximale Entladung pro Umlauf SL BEV ohne Pantographen ohne Schnellladung Depot FVUI

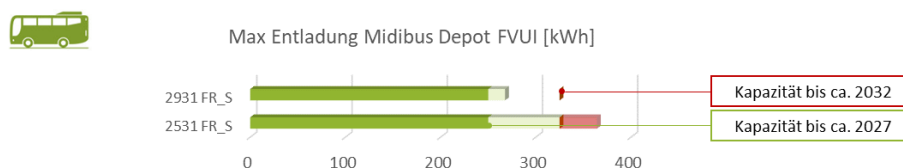


Abb. 6: Maximale Entladung pro Umlauf Midi BEV ohne Pantographen ohne Schnellladung Depot FVUI

Betrachtung mit Schnellladung an Holländischer Straße

Im ersten Ansatz wurde vernachlässigt, dass durch das MEKS-Projekt bereits eine Schnellladestation an der Holländischen Straße im Aufbau ist. Für eine Dekarbonisierung steht also bereits eine Schnellladestation zur Verfügung. Für alle weiteren Arbeitsschritte wird die Schnellladestation als gegeben angenommen.

Wenn die Energieverbrauchsberechnung mit dem Ladepotenzial an der Holländischen Straße überlagert wird, ergibt sich bereits ein deutlich besseres Gesamtbild.

Anmerkung

Dargestellt ist die maximale Entladung der Traktionsbatterie. Dies entspricht der notwendigen Speicherkapazität, um die Umläufe inklusive Nachladung zu erfüllen.

Fahrzeuge mit Pantographen haben gegenüber Modellen ohne Pantographen eine reduzierte Batteriekapazität. Die Grenzwerte in den Grafiken (hier) entsprechen denen von Modellen ohne Pantographen, da nicht alle Umläufe von der Schnellladestation an der Holländischen Straße ‚profitieren‘. Die Unterschreitung des Grenzwertes der heute verfügbaren Batteriekapazität aller Umläufe, die an der Holländischen Straße nachladen können, ist jedoch so groß, dass sie auch bei reduzierter Kapazität weiterhin „heute machbar“ sind.

Die Wirkung der Schnellladung wird am deutlichsten, wenn die Ergebnisse mit und ohne Schnellladung an der Holländischen Straße direkt einander gegenübergestellt werden.

Wie in den folgenden Grafiken erkennbar (rote Kästen), profitieren neun Gelenkbusumläufe und zwei Solobusumläufe bereits ohne Umlaufanpassung sehr deutlich von der Schnelllademöglichkeit an der Holländischen Straße. Die geplanten MEKS-Umläufe sind Teil dieser Umlaufmenge. Darüber hinaus gibt es einzelne Umläufe, die im geringen Maß durch die Schnellladung verbessert werden können.

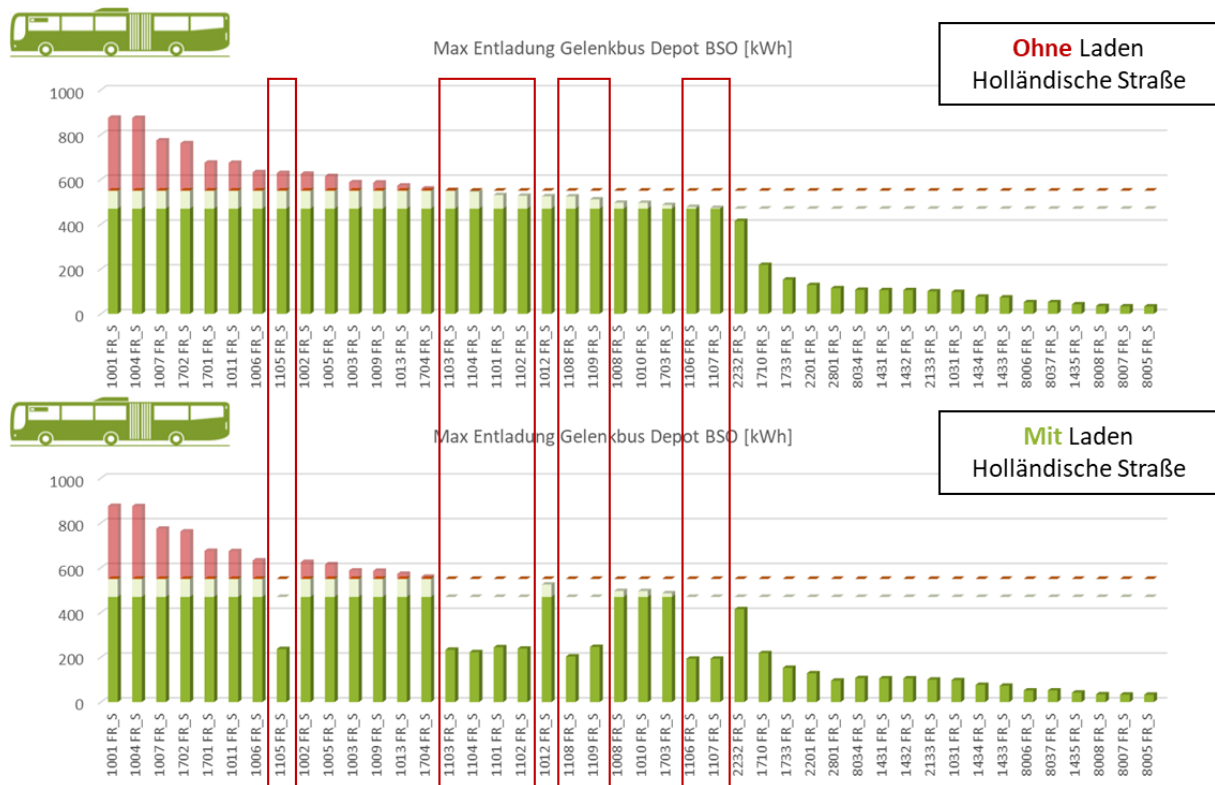


Abb. 7: Maximale Entladung pro Umlauf GL BEV ohne und mit Schnellladung Holländische Straße Depot BSO

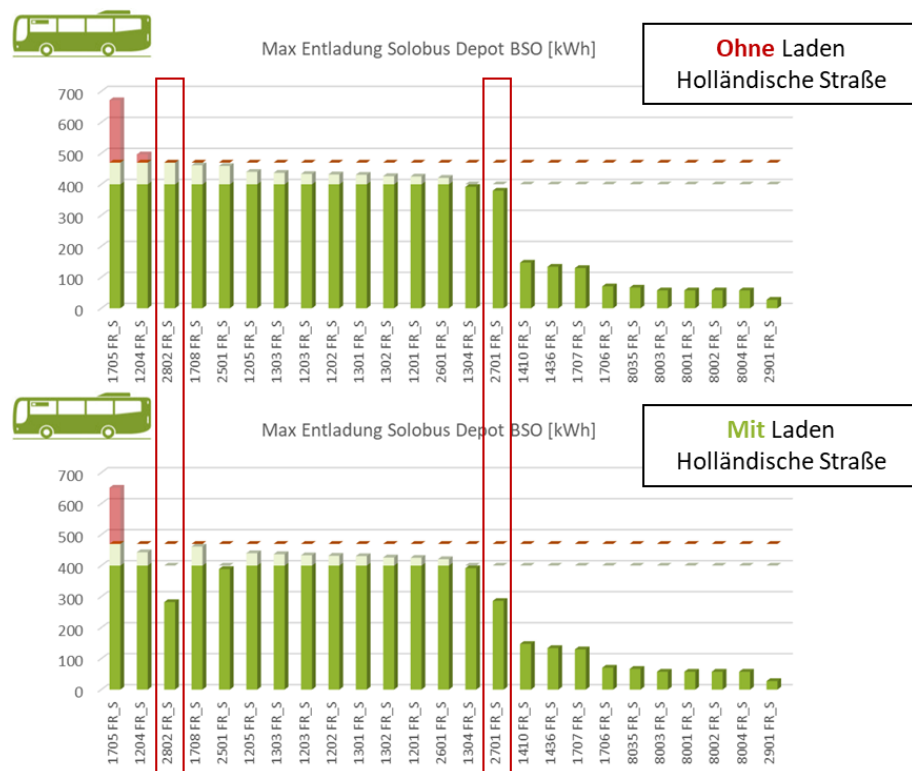


Abb. 8: Maximale Entladung pro Umlauf GL BEV ohne und mit Schnellladung Holländische Straße Depot BSO

Da die Station Holländische Straße nur von durch die KVG selbst betriebenen Umläufen angefahren wird, entfällt die ergänzende Betrachtung des Depots FVUI ab hier.

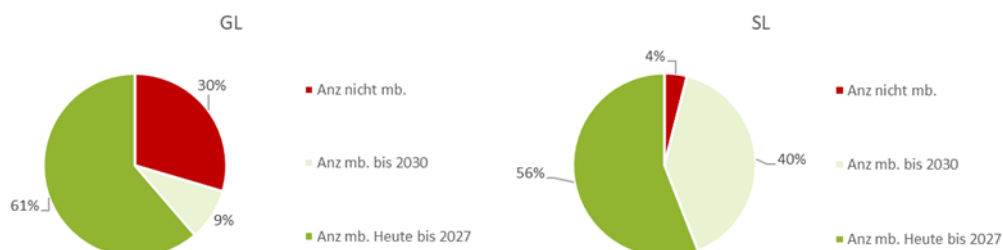


Abb. 9: Zeitpunkte Machbarkeit BEV ohne Pantographen ohne Schnellladung Depot BSO

Bei Zuordnung der Umläufe zu den Zeitintervallen, in denen diese als machbar charakterisiert werden, zeigt sich ebenfalls eine deutliche Verbesserung durch die Schnellladestation. Auch wenn weiterhin ein deutlicher Anteil an Umläufen erhalten bleibt, der zunächst als nicht machbar charakterisiert wird, steigt der Anteil der heute machbaren Umläufe merklich an.

Hochfrequentes Zwischenladen

Die verfolgten Analyseschritte berücksichtigen eine weitestgehende Beibehaltung der aktuellen Umlaufstruktur. Die Energiezuführung erfolgt im Depot und darüber hinaus an ausgewählten Wendestellen (Schnellladestationen), wenn dies sinnvoll oder erforderlich ist.

Grundsätzlich können auch Ansätze mit hochfrequenter Zwischenladung in ein Dekarbonisierungskonzept aufgenommen werden. Anstatt die Nachladung auf Wendestellen mit mehrminütigen Aufenthalten zu beschränken, werden hierbei wesentlich mehr Haltestellen zu Ladepunkten erweitert. Fahrzeuge werden mit einer kleinvolumigen aber sehr leistungsstarken Batterie ausgestattet (sog. Leistungsbatterie), die mit sehr hoher Ladeleistung an Haltestellen nachgeladen wird. Die Nachladung erfolgt nicht in Betriebspausen, sondern während Fahrgäste zu- und aussteigen.

Theoretisch können aufgrund der permanenten Nachladung unendliche Einsatzreichweiten erzielt werden. Dafür sind neben umfangreichen Infrastrukturen auch periodische Einsatzplanungen erforderlich. Der Fokus wird von einer Umlaufanalyse zu einer Linienanalyse verschoben. Untersucht werden nicht die einzelnen Fahrzeuge, sondern die Bewegungsmuster eines festen Linienweges. Pro Linienumlauf wird untersucht, welche Energiemengen erforderlich sind beziehungsweise wie viele Haltestellen mit Schnellladeinfrastruktur ausgerüstet werden müssen, um diese Energiemenge im Normalbetrieb zuzuführen. Die Anzahl lässt sich pauschal nicht abschätzen. Eine Größenordnung von 50 % aller Haltestellen, die mit Schnellladern ausgerüstet werden müssen, ist jedoch nicht unrealistisch. In jedem Fall liegt die notwendige Anzahl deutlich über den hier betrachteten Ansätzen.

Um eine hochfrequente Schnellladung im Detail zu untersuchen, wäre eine linienreine Umlaufplanung erforderlich. Darüber hinaus muss auch die Linienführung selbst konstant sein und regelmäßig die gleichen Fahrwege verfolgen, um die Infrastrukturen anzufahren.

Montag - Freitag															
Anmerkung															
Rasennallee ab	7.27	alle	13.27	13.47	13.47	14.07	14.27	alle	19.07	19.30	19.45				
Seeburgstraße	7.30	20	13.30	13.50	13.50	14.10	14.30	20	19.10	19.33	19.48				
Am Kubergraben		Min.	13.42			14.02	14.22	Min.	19.02	19.22					
Karlshafener Straße	7.35		13.35	13.45	13.55	14.05	14.15	14.25	14.35	19.05	19.15	19.25	19.37	19.52	
Ahnatalstraße	7.37		13.37	13.47	13.57	14.07	14.17	14.27	14.37	19.07	19.17	19.27	19.39	19.54	
Bf Harleshausen	7.39		13.39	13.49	13.59	14.09	14.19	14.29	14.39	19.09	19.19	19.29	19.41	19.56	
Frasenweg	7.43		13.43	13.53	14.03	14.13	14.23	14.33	14.43	19.13	19.23	19.33	19.44	19.59	
Engelhardstraße	7.46		13.46	13.56	14.06	14.16	14.26	14.36	14.46	19.16	19.26	19.36	19.47	20.02	
Siemensstraße	7.48		13.48	13.58	14.08	14.18	14.28	14.38	14.48	19.18	19.28	19.38	19.49	20.04	
Hauptbahnhof	7.53	alle	13.53	14.03	14.13	14.23	14.33	14.43	14.53	alle	19.23	19.33	19.43	19.54	20.09
Scheidemannplatz	7.54	10	13.54	14.04	14.14	14.24	14.34	14.44	14.54	10	19.24	19.34	19.44	19.55	20.10
Königsplatz/Mauerstraße an	7.56	Min.	13.56	14.06	14.16	14.26	14.36	14.46	14.56	Min.	19.26	19.36	19.46	19.57	20.12
Königsplatz/Mauerstraße ab	7.58		13.58	14.08	14.18	14.28	14.38	14.48	14.58		19.28	19.38	19.48	20.01	20.16
Am Stern	8.00		14.00	14.10	14.20	14.30	14.40	14.50	15.00		19.30	19.40	19.50	20.03	20.18
Altmarkt/Regierungspräsidium	8.02		14.02	14.12	14.22	14.32	14.42	14.52	15.02		19.32	19.42	19.52	20.05	20.20
Platz der Deutschen Einheit	8.05		14.05	14.15	14.25	14.35	14.45	14.55	15.05		19.35	19.45	19.55	20.08	20.23
Nürnberger Straße	8.09		14.09	14.19	14.29	14.39	14.49	14.59	15.09		19.39	19.49	19.59	20.12	20.27
Waldemar-Petersen-Straße	8.13		14.13	14.23	14.33	14.43	14.53	15.03	15.13		19.43	19.53	20.03	20.15	20.30
Gesamtschule Waldau	8.16		14.16	14.26	14.36	14.46	14.56	15.06	15.16		19.46	19.56	20.06	20.18	20.33
Crumbacher Straße	8.21	alle	14.21			14.51		15.21	alle	19.51					
Industriepark Waldau/IKEA	8.23	30	14.23			14.53		15.23	30	19.53					
Richard-Roosen-Straße	8.29	Min.	14.29			14.59		15.29	Min.	19.59					
Bildungszentrum	8.31		14.31			15.01		15.31		20.01					
Auestadion an	8.39		14.39			15.09		15.39		20.09					

Abb. 10: Ausschnitt Fahrplan Linie 11

Im Fall der KVG würde dies umfangreiche Neuplanungen bedeuten, die nach Auffassung von eebe überflüssig sind. Nach aktuellem Stand der Technik ist hochfrequentes Zwischenladen nur in Sondersituationen sinnvoll. Die Batterietechnik inklusive der antizipierten Entwicklung erlaubt einen Einsatz analog zur heutigen Dieseltechnik. Nennenswerte Anteile der heutigen Einsätze können mit weniger aufwendigen Sondermaßnahmen bereits heute machbar gestaltet werden. Hochfrequentes Zwischenladen eignet sich für Liniensegmente mit sehr hohen Passagieraufkommen, die über einen langen Zeitraum am Tag mit hoher Taktfrequenz gefahren werden. Bei sehr dichten Fahrtakten können eine Vielzahl Fahrzeuge die notwendigen Ladepunkte nutzen, was die verbundenen Kosten relativieren kann, indem anderweitig gegebenenfalls notwendige Zusatzfahrzeuge eingespart werden. Als plastisches Beispiel werden häufig Innenstadtlinien in Großstädten angeführt, die nicht durch Straßen- oder Stadtbahnen abgedeckt werden können.

Anmerkung

Das an dieser Stelle diskutierte **hochfrequente** Zwischenladen ist nicht zu verwechseln mit dem Zwischenladen an Wendestellen. Auch wenn der Aufbau ähnlich ist, werden unterschiedliche Ladestrategien gefahren. Im hochfrequenten Ansatz sind eine Vielzahl an Ladestationen auf dem Linienweg erforderlich. Diese werden an „normalen“ Haltestellen ohne nennenswerte Wartezeiten platziert. Die Ladeleistung muss ausreichend hoch dimensioniert werden (Größenordnung 500 kW und mehr), um die Energie in sehr kurzer Zeit zu transportieren.

Beim Zwischenladen an Wendestellen werden umlaufbedingte Wartezeiten zur Nachladung ausgenutzt. Hier sind nur einzelne Ladepunkte erforderlich (Größenordnung 300 kW), die jeweils über einen längeren Zeitraum genutzt werden.

Für die KVG erscheint dieser Ansatz nicht sinnvoll. Vielmehr bietet es sich hier an, die Nachladung auf Wendestellen zu beschränken. Somit können problematische Umläufe gezielt unterstützt werden und die Umlaufstruktur kann beibehalten werden. Die Anzahl notwendiger Schnellladestationen wird auf ein Minimum begrenzt, was auch für die spätere Realisierung entscheidend ist. In Abstimmung mit der KVG wurde entschieden, den Fokus auf die im Bericht dargestellten Antriebsvarianten zu setzen, ohne eine Linienanalyse für ein hochfrequentes Zwischenladen auszuführen.

1.4.2 Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV)

Auch bei Betrachtung der Wasserstoffverbrauchsmengen kann die Unterteilung in Lang- und Kurzfahrten beobachtet werden, da die Energieverbräuche beziehungsweise Energieträgermengen in erster Näherung proportional zueinander sind.

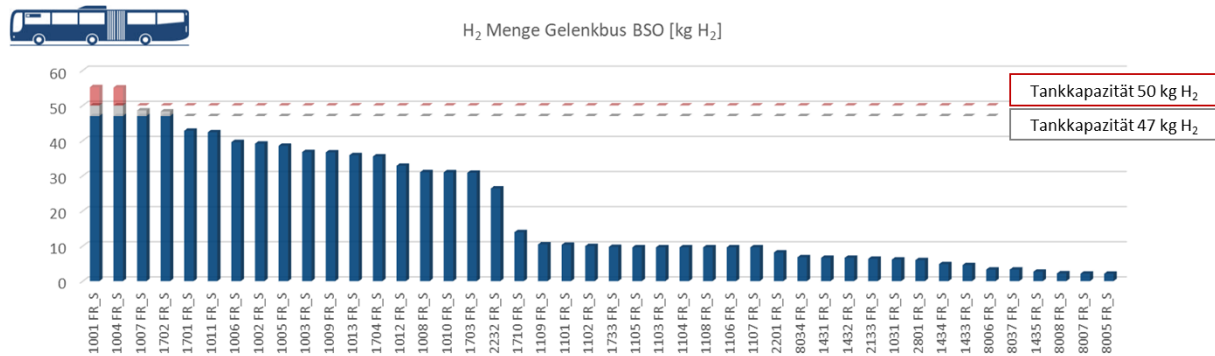


Abb. 11: Energiemengen pro Umlauf GL FCEV Depot BSO

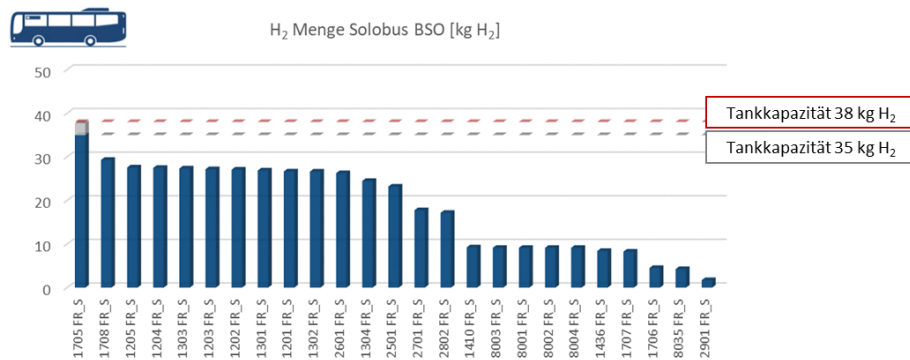


Abb. 12: Energiemengen pro Umlauf SL FCEV Depot BSO

Es ist erkennbar, dass der Anteil unkritischer Umläufe höher ist als für BEV. Dies geht darauf zurück, dass nach Stand der Technik Brennstoffzellenbusse einen Reichweitenvorteil gegenüber BEV aufweisen. Gleichzeitig lässt sich auch erkennen, dass auch für FCEV ein Anteil kritischer Umläufe zu verzeichnen ist. Dies geht darauf zurück, dass FCEV zwar einen Reichweitenvorteil gegenüber BEV aufweisen, gegenüber Dieselbussen jedoch ebenfalls reichweitenlimitiert sind. Grund hierfür ist die volumetrische Energiedichte von Wasserstoff. Während ein Kubikmeter Dieseldieselfkraftstoff einen Energiegehalt etwa 38.000 MJ aufweist, sind es bei Wasserstoff verdichtet auf 350 bar etwa 3.400 MJ. Auch wenn der Verbrennungsprozess stärker verlustbehaftet ist, bleibt Dieseldieselfkraftstoff mit Abstand der raumeffizienteste Energieträger. Aufgrund der begrenzten Bauräume im Fahrzeug kann mit Dieseldieselfkraftstoff die höchste Reichweite erzielt werden.

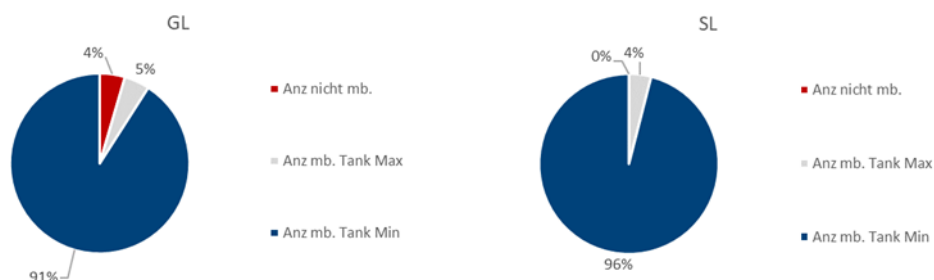


Abb. 13: Machbarkeit abhängig von Tankgrößen FCEV Depot BSO

In jedem Fall erscheinen FCEV auf rein technischer Basis zunächst als die zu präferierende Antriebsalternative. Auch wenn für FCEV ein Anpassungs- beziehungsweise Optimierungsbedarf vorliegt, sollte dieser wesentlich geringer ausfallen als für das batterieelektrische Pendant.

Für eine Bewertung der Ergebnisse muss auch die Kostensituation in Kontext gezogen werden. Die Kosten für ein FCEV-System sind im Allgemeinen deutlich höher als für BEV. Auslöser sind hier weniger die höheren Investitionskosten als die deutlich höheren Betriebskosten.

Bei Betrachtung der Wirkungsgradketten von BEV und FCEV im direkten Vergleich werden die höheren Betriebskosten erklärbar.

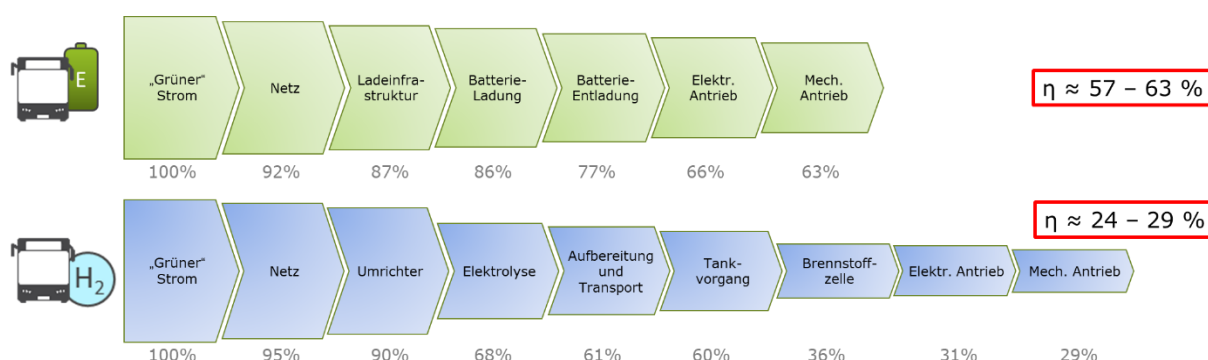


Abb. 14: Wirkungsgradketten BEV und FCEV

Für globale Emissionsfreiheit muss „grüner“ Strom als Primärenergie eingesetzt werden. Während im oberen Diagramm lediglich elektrische Verluste entstehen, erfolgt bei FCEV ein Wandel des Energieträgers. Elektrische Energie wird in Wasserstoff gewandelt (Elektrolyse) und letztlich im Fahrzeug wieder in elektrische Energie transformiert. Naturgemäß sind diese Wandlungsprozesse stark verlustbehaftet, was die deutlichen Unterschiede im Gesamtwirkungsgrad erklärt.

1.4.3 Umlaufverknüpfung

Bisher wurden Einzelumläufe betrachtet und bewertet, die am Depot starten und enden. In der Praxis werden teilweise mehrere Einzelumläufe von einem Fahrzeug nacheinander bedient, wenn dies zeitlich möglich ist. Ein Fahrzeugtagesumlauf kann mehrere Einzelumläufe beinhalten.

Da mit dieser Untersuchung das Ziel verfolgt wird, die Auswirkungen verschiedener emissionsfreier Antriebstechniken zu bewerten, wird auch die Fahrzeugmenge für Dieselbusse nach demselben Verfahren berechnet. Damit werden mögliche betriebsspezifische Einflüsse auf die Fahrzeugdisposition aus der Betrachtung ausgeschlossen. Faktoren wie bestimmte

Außengestaltungen auf gewissen Linien, Fahrzeugalter und ähnliches werden hier zurückgestellt, um eine einheitliche Vergleichsbasis zu schaffen. Die Umlaufverknüpfung erfolgt separat pro Fahrzeugtyp. Da hier nur das Depot BSO im Fokus steht, entfällt die Unterscheidung pro Depot.

Für die Betrachtung wird im weiteren Verlauf der Begriff der Einsatzflotte eingeführt. Die Einsatzflotte verkörpert die Fahrzeugmenge, die nach Berechnung von eebc zur Erfüllung aller Umläufe erforderlich ist. Ergänzend muss eine Reserveflotte vorgehalten werden, um Ausfälle zu kompensieren, Sonderfahrten durchzuführen und geplante Serviceeinsätze zu ermöglichen. Da die Busse der Reserveflotte keinen zusätzlichen Energiebedarf aufweisen, sind sie nicht für die Machbarkeitsbewertung relevant. Vielfach wird im Folgenden die Einsatzflotte als Bezugsgröße verwendet.

Die Berechnung der Einsatzflotte geht hier auf die aktuelle Umlaufliste zurück. Betriebsspezifische Aspekte sind vernachlässigt. Es wird darüber hinaus (nach Abstimmung mit dem Auftraggeber) vorausgesetzt, dass alle Solobusse auf allen Solobusumläufen einsetzbar sind, sofern im Verlauf der Untersuchung kein Technologie-Mix als Vorzugstechnologie verfolgt wird. Im Rahmen der Fahrzeugbeschaffung muss sichergestellt sein, dass die Fahrzeugausführung (z.B. Anzahl der Türen) für alle Linien und Einsatzfälle gleichermaßen geeignet ist. Sollte ein Technologie-Mix als Vorzugstechnologie empfohlen werden, muss die Umlaufverknüpfung getrennt für die BEV- und FCEV-Teilflotte erfolgen, da entweder ein BEV oder ein FCEV für beide Einzelumläufe eingesetzt wird.

Es ist möglich, dass die Fahrzeugmenge für alternative Antriebe erhöht werden muss, wenn die Aufenthaltsdauer im Depot zwischen zwei Einzelumläufen nicht ausreicht, um die Batterie vollzuladen oder den Wasserstofftank zu befüllen. Eine Teilladung von BEV ist möglich, wenn damit ebenfalls beide Einzelumläufe erfüllt werden können. Falls der Energiespeicher ausreichend groß ist, um beide Einzelumläufe zu erfüllen, muss keine Zwischenladung oder Nachbetankung erfolgen. In diesem Fall wird die Anwesenheitsdauer dennoch für eine Nachladung genutzt, was im Rahmen des Energiekonzeptes berücksichtigt wird.

Für den Anwendungsfall ergeben sich aus der Umlaufverknüpfung keine Probleme. Die Aufenthaltsdauern sind ausreichend, um die Batterien bei den BEV-Ansätzen vollzuladen (Ladeleistung 130 kW). Analoges gilt für FCEV. Hier sind die Aufenthaltsdauern in jedem Fall ausreichend groß, um Busse nachzutanken, wenn die Tankanlage im näheren Umfeld des Depots angesiedelt ist.

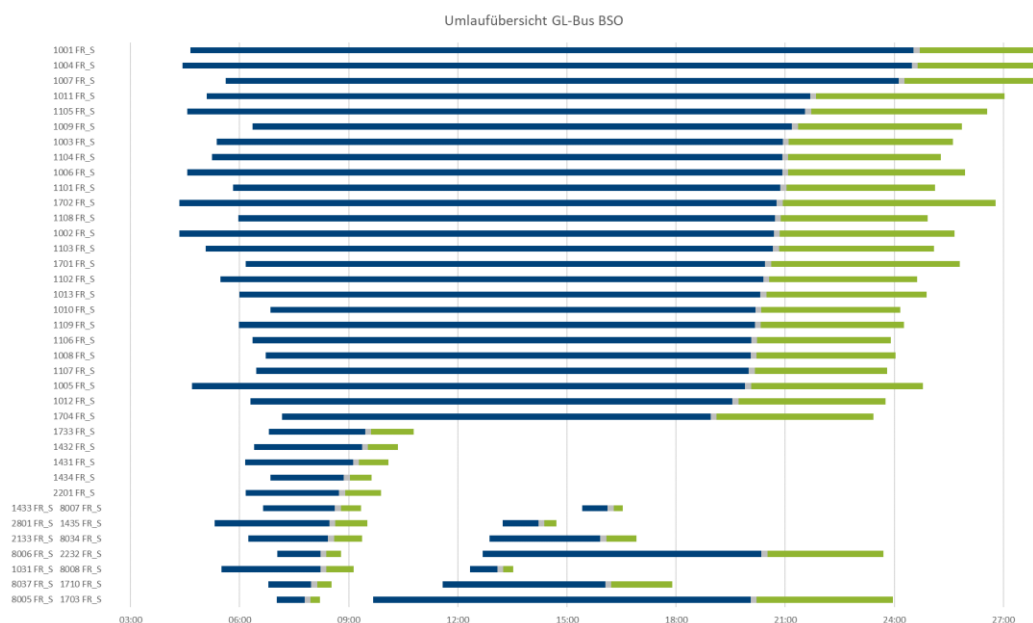


Abb. 15: Umlaufübersicht Gelenkbusse BEV Depot BSO

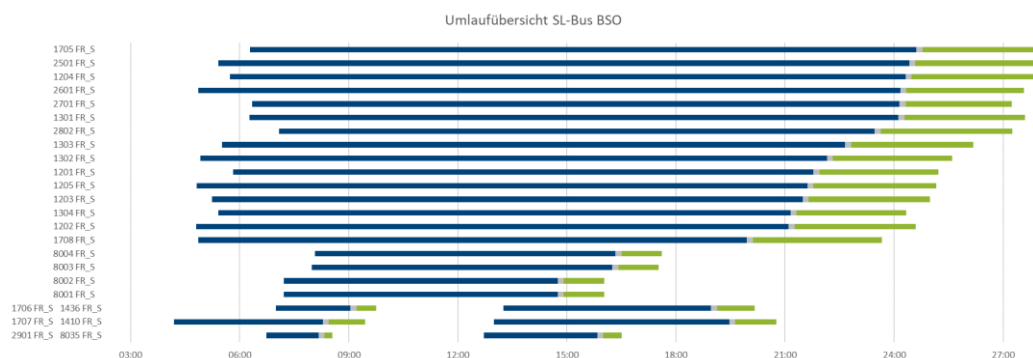


Abb. 16: Umlaufübersicht Solobusse BEV Depot BSO

Anmerkung

Der obige Betrachtungsfall birgt die anspruchsvollsten Umstände für die Umlaufverkettung. Sämtliche erforderliche Energie wird im Depot nachgeladen (kein Schnellladen auf Linie). Entsprechend sind die Ladezeiten zwischen den Einzelumläufen maximal. Wenn im weiteren Verlauf eine Schnellladung unterstellt wird, sinkt die Energiemenge, die im Depot zwischen zwei Einzelumläufen nachgeladen werden muss. Die Aufenthaltsdauer bleibt gleich. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Umlaufverknüpfung ebenfalls unproblematisch ist, wenn das Modell um eine Schnellladung an Wendestellen erweitert wird.

1.4.4 Interpretation der Ergebnisse

Auf Basis des Status Quo zeigen sich die Vorteile der FCEV-Technik gegenüber BEV. Mit Wasserstoff als Energieträger lassen sich heute größere Reichweiten erzielen. Dem gegenüber steht eine gute technische Entwicklungsprognose für BEV, so dass eine technische Gleichwertigkeit in Bezug auf Reichweite in ca. 10 Jahren erwartet wird. Gleichzeitig sind BEV-Systeme bereits heute im Großteil aller Busanwendungen kostengünstiger als FCEV.

In Bezug auf die Reichweite hat FCEV einen Vorteil gegenüber BEV. Im nächsten Schritt wird die Kostenseite betrachtet. Maßgeblich ist die angestrebte Vollumstellung. Bis hier lässt sich nur festhalten, dass für eine Vollumstellung mit BEVs Optimierungsmaßnahmen in größerem Umfang erforderlich sind als für FCEV. Da jedoch die Gesamtkosten und nicht der Umfang von Maßnahmen relevant für die Auswahl einer Vorzugstechnologie sind, müssen die erforderlichen Maßnahmen für eine Vollumstellung im nächsten AP zunächst konkret hergeleitet werden, um diese abschließend kommerziell zu bewerten.

Es kann festgehalten werden, dass Wasserstoff als Mobilitätsgrundlage deutliche Vorteile erzeugt. Wasserstoff ist vergleichsweise gut transportfähig und kann auch längerfristig mit überschaubaren Verlusten gespeichert werden. Gleichzeitig ist der Primärenergiebedarf höher und die erforderlichen Investitionen sind höher. Salopp formuliert müssen die Vorteile der Wasserstofftechnik erkaufte werden. Diverse Studien und Berechnungen bestätigen diesen Umstand und weisen deutlich höhere Gesamtkosten pro Kilometer für FCEV gegenüber BEV aus.

Wir empfehlen langfristige Kostenprognosen für grünen Wasserstoff zu gegenüber heute vergünstigten Marktpreisen kritisch zu hinterfragen. Während im straßengebundenen mobilen Sektor Antriebsalternativen zur Verfügung stehen, ist der Energieträger für andere Sektoren im Zuge der Energiewende alternativlos. Luftverkehr und Stahlindustrie sind zwei Beispiele hierfür. Es ist anzunehmen, dass aufgrund der erwarteten hohen Nachfrage auch der Marktpreis für Wasserstoff, insbesondere grünen Wasserstoff, höher ausfallen wird.

1.5 AP 1.5 Konfiguration des Fahrzeugsystems hinsichtlich der Optimierung des Energieverbrauchs

Grundsätzlich können alle marktverfügbaren Antriebsvarianten ‚technisch machbar‘ gestaltet werden, indem entsprechende Sonder- oder Optimierungsmaßnahmen angewendet werden. Im Zweifel muss ‚lediglich‘ die Fahrzeugmenge wesentlich erhöht werden. Mit Hinblick auf die Empfehlung einer Vorzugstechnologie müssen die notwendigen Zusatzmaßnahmen für eine Flottenumstellung bis 2030 erfasst und bewertet werden. Das ausschlaggebende Kriterium ist letztlich der zu erwartende finanzielle Aufwand, da alle Varianten die Kernbedingung Emissionsfreiheit vollumfänglich erfüllen.

In den nächsten Schritten werden alle relevanten Optimierungsmaßnahmen diskutiert, bevor sie im direkten Vergleich einander gegenübergestellt werden.

1.5.1 Optimierung der Fahrzeuge

Die Optimierung des Fahrzeugs als Energieverbraucher ist wünschenswert, jedoch nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich. Batterie- und Brennstoffzellenbusse sind Standardprodukte, die nur in engen Grenzen variabel ausgeliefert werden. Neben den aus Dieselfahrzeugen bekannten

Gestaltungsoptionen für den Innenraum sind dies insbesondere verschiedene Speichergrößen und Schnittstellenausführungen.

Eine gezielte Optimierung der Fahrzeuge würde sich beispielsweise auf Leichtbau, integrierte Aufbaukonzepte für Batteriespeicher (Sandwichboden, Chassis- oder Karosserieintegration) und ähnliches stützen. Diese Maßnahmen sind Teil der herstellereigenen Produktentwicklung und von außen nicht steuerbar. Maßgeblich für den Betreiber sind zwei Faktoren, die sich als Endprodukt der herstellerabhängigen Optimierung ergeben: Energieverbrauch pro km (inklusive HVAC) und Produktqualität. Im Rahmen des Beschaffungsprozesses sollte auch der Aspekt Wartung und Reparatur genau ins Auge gefasst werden. Leichtbaukonzepte können beispielsweise aufwendiger sein, wenn Instandsetzungen an der Karosserie erfolgen müssen.

Für die Bearbeitung der Studie setzen wir einen konservativen Verbrauchswert an, um die Marktvarianz abzubilden. Grundsätzlich verfolgen wir die Philosophie, eine tendenziell pessimistische Prognose für die weitere Berechnung anzusetzen, um ‚böse Überraschungen‘ bei der Realisierung zu vermeiden.

Hinweis

Grundsätzlich empfehlen wir den produkt- und modellspezifischen Verbrauch für die Realisierung im Ausschreibungsprozess zu berücksichtigen. Zum Beispiel indem die erwarteten Verbrauchswerte im Einsatzgebiet von den Anbietern in Erfahrung gebracht werden. Dabei sollten unbedingt auch Verbrauchswerte für den Worst-Case erfragt werden, indem beispielsweise eine minimale Außentemperatur für dieses Szenario konkret vorgegeben wird.

1.5.2 Technische Entwicklung Traktionsbatterie

Das größte fahrzeugseitige Optimierungspotenzial liegt in der technischen Entwicklung der Traktionsbatterie begründet und betrifft damit den Batteriebus. Die Batterietechnik hat eine rasante Entwicklungskurve durchlaufen. Es wird angenommen, dass dieser Trend fortgesetzt wird, wobei es unklar ist, in welchem Maß dies genau erfolgt.

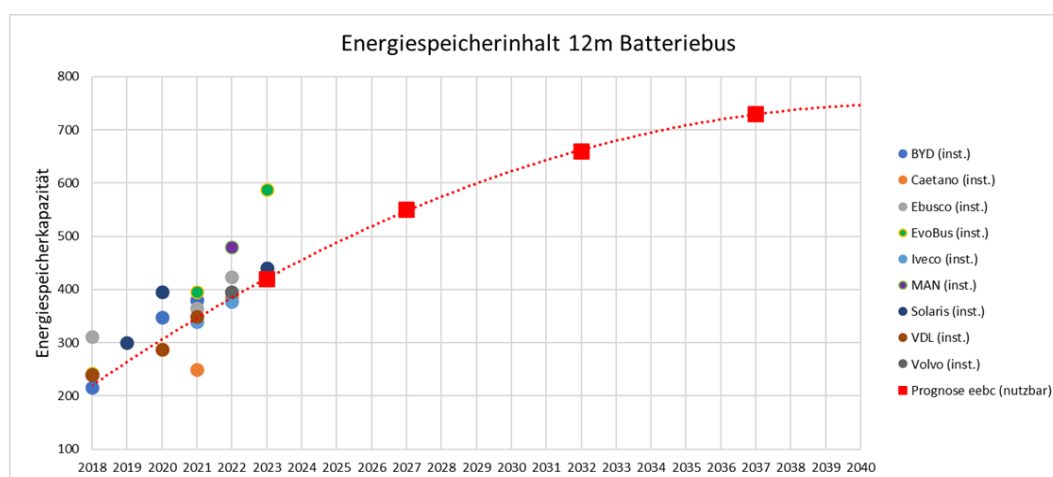


Abb. 17: Beispiel Entwicklungsprognose Batterietechnik (inst. = installiert)

Im Gegensatz zu anderen Verkehrsunternehmen verfolgt die KVG das Ziel, die Dekarbonisierung des Fuhrparks bis 2030 abzuschließen. Während bei einer zeitlich gestreckten Umstellung die

technische Entwicklung ausgenutzt werden kann, indem herausfordernde Einsätze erst in zehn oder mehr Jahren elektrifiziert werden, muss hier ein engerer Zeitrahmen berücksichtigt werden. Einsätze, die nach der antizipierten technischen Entwicklung bis 2030 nicht elektrifizierbar sind, müssen über anderweitige Anpassungs- und Optimierungsmaßnahmen machbar gestaltet werden. Beispiele sind das Zwischenladen oder die Anpassung von Umläufen.

Es sind hier zwei mögliche Kapazitätswerte als Grenzwert für die marktverfügbare Batteriekapazität relevant. Aufgrund der konservativen Grenzwertbestimmung ist anzunehmen, dass am Markt größere Energiespeicher verfügbar sein werden, als hier unterstellt. Eine exakte Quantifizierung der zukünftigen Speichergrößen im Bus-ÖPNV ist nicht möglich. Für die Analyse müssen prognostizierte Werte unterstellt werden.

1.5.3 Umlaufanpassung

1.5.3.1 Umlaufanpassung BEV Gesamtflotte

Zunächst steht die Umlaufanpassung als Optimierungsansatz für BEV im Vordergrund. Hierbei wird unterstellt, dass alle Fahrzeuge mit Ausnahme der MEKS-Busse ausschließlich im Depot laden und mit einer CCS-Ladeschnittstelle ausgestattet sind. Die Batteriekapazität wird entsprechend für Modelle ohne Pantographen gewählt⁵.

MEKS-Busse beziehungsweise die dazugehörigen Umläufe werden hier zeitweise aus der Betrachtung ausgeklammert. Für diese Fahrzeuge besteht durch die Schnellladestation an der Holländischen Straße bereits ein Optimierungskonzept, so dass hier keine weiteren Maßnahmen erforderlich sind.

An dieser Stelle wird zunächst das Potenzial der Umlaufanpassung als primärer Optimierungsansatz für die Gesamtflotte betrachtet. Gegenüber der detailliert ausgearbeiteten Umlaufanpassung im Rahmen von AP 1.7 wird hier eine allgemeinere Herangehensweise verfolgt. Ziel ist es, zunächst die Mehraufwendungen belastbar abzuschätzen, um im direkten Vergleich zu anderen Optionen die sinnvollste Gesamtstrategie zu identifizieren und auf der Basis eine Technologieempfehlung auszusprechen.

Im Fokus steht die Abschätzung des Fahrzeugbedarfs, wenn alle Umläufe (außer MEKS-Umläufe) mit CCS-Schnittstelle und maximal großer Batterie bedient werden sollen. Die Abschätzung erfolgt erfahrungsbasiert, wobei wir auf die Ergebnisse einer Vielzahl ähnlicher Analysen zurückgreifen. Um die verbundene Ungenauigkeit einer Abschätzung zu kompensieren, wird neben einem Erwartungswert auch eine pessimistischere Variante mit einer erhöhten Fahrzeugmenge berücksichtigt. Der abgeschätzte Fahrzeugbedarf wird abschließend als Wertebereich angegeben.

Bei Betrachtung der Umlaufverknüpfung wird ersichtlich, dass eine Vielzahl der Gelenkbusse ab dem späten Vormittag zeitweise oder dauerhaft nach Vollladung ungenutzt im Betriebshof steht (Kasten in Abbildung).

⁵ Größere Batterievvariante: Zum Beispiel 400 kWh für Solobusse gegenüber 350 kWh für Variante inkl. Pantograph

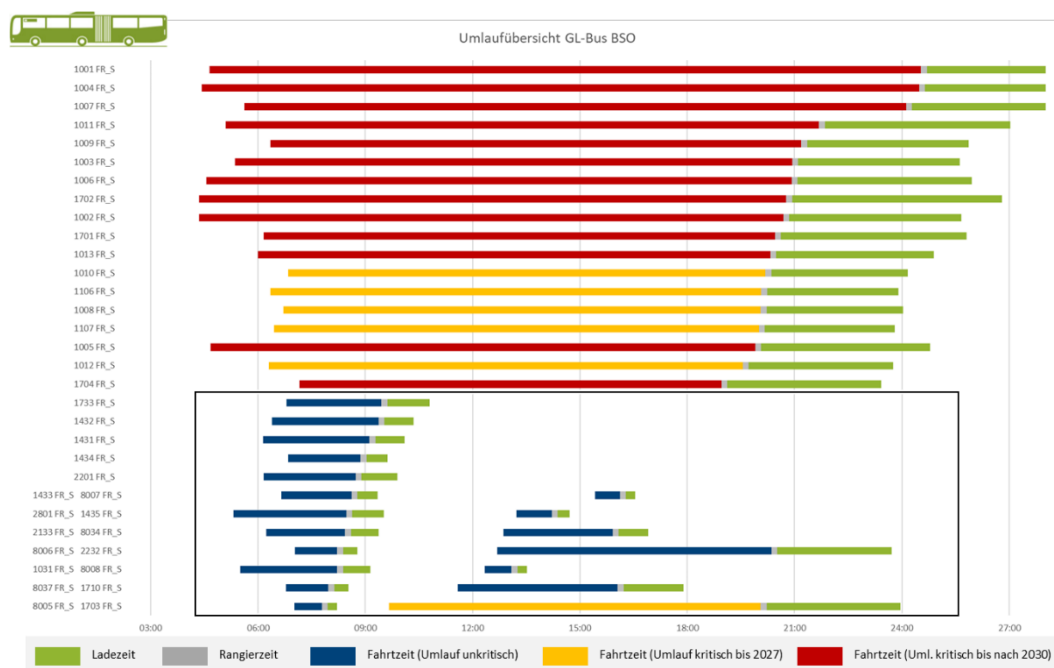


Abb. 18: Übersicht Umlaufverknüpfung Gelenkbusse Depot BSO (erweitert)

Die zeitweise ungenutzten Fahrzeuge können verwendet werden, um reichweitenkritische Umläufe abzulösen. Das abgelöste Fahrzeug des reichweitenkritischen Umlaufs fährt das Depot zur Nachladung an. Nach Vollandung steht der Bus wieder zur Verfügung, um einen weiteren kritischen Umlauf abzulösen oder einen Folgeumlauf am Nachmittag zu bedienen. Abhängig von der Aufenthaltsdauer im Depot, nach Vollandung der Batterie, kann abgeschätzt werden wie viele reichweitenkritische Umläufe unterstützt werden können. Dabei wird das Springerbusprinzip angewendet. Ein abgelöster Bus „übernimmt“ die ursprünglichen Einsätze des ablösenden Busses. Die Fahrzeuge „tauschen“ also ihre Einsätze.

Wie in der obigen Abbildung erkennbar, enden Teile der Umläufe frühzeitig ohne Folgeumlauf, während andere nach der Standzeit Folgeumläufe bedienen. Fünf Fahrzeuge stehen ab ca. 10 bis 11 Uhr für den restlichen Betriebstag zur Verfügung. Jeder dieser Busse kann ca. zwei bis drei kritische Umläufe unterstützen. In vielen Fällen können bei geschickter Umlaufanpassung auch mehr als drei kritische Einsätze unterstützt werden. Darüber hinaus gibt es vier Busse, die nach Beendigung eines zweiten Einzelumlaufs (Intervall ca. 13 bis 17 Uhr) für den restlichen Betriebstag zur Verfügung stehen. Jeder dieser Busse kann einen weiteren Umlauf unterstützen.

Sechs Busse weisen zusätzliche eine längere Aufenthaltsdauer zwischen zwei Einzelumläufen auf. Fünf Busse stehen für ca. 3 Stunden zur Verfügung und können jeweils einen reichweitenkritischen Umlauf ablösen (der abgelöste Bus übernimmt in diesen Fällen den Folgeumlauf). In einem Fall liegt die Aufenthaltsdauer bei ca. sechs Stunden. In diesem Fall können ein bis zwei kritische Umläufe unterstützt werden.

Addiert ergibt sich ein Potenzial von 20 bis 25 reichweitenkritischen Umläufen, die bereits heute durch zeitweise ungenutzte Gelenkbusse unterstützt werden können. Der Nachvollziehbarkeit halber sind die Umläufe in der Grafik oben farblich markiert. In Orange sind Umläufe gehalten, die zwar heute als kritisch bewertet werden, jedoch ab ca. 2028 als machbar eingeschätzt werden. In Rot sind jene Umläufe markiert, die trotz technischer Entwicklung auch nach 2028 als reichweitenkritisch eingeschätzt werden. Es ergeben sich:

- 6 Busse mit bis 2027 kritischen Einsätzen (Orange)
- 13 Busse mit langfristig kritischen Einsätzen (Rot)

Es liegt ein Potenzial zur Umlaufanpassung für 20 bis 25 Busse vor. Entsprechend ist davon auszugehen, dass alle Gelenkbusumläufe durch Umlaufanpassung machbar gestaltet werden können, **ohne einen Fahrzeugmehrbedarf auszulösen**.

Die Betrachtung der Solobusse erfolgt nach demselben Muster.

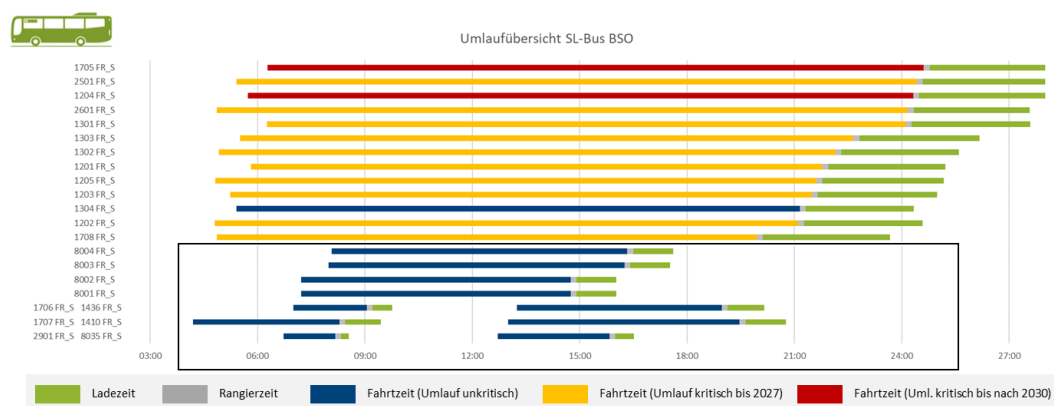


Abb. 19: Übersicht Umlaufverknüpfung Solobusse Depot BSO (erweitert)

Gegenüber den Gelenkbussen ist hier die Menge zeitweilig ungenutzter Fahrzeuge (Kasten) geringer. Gleichzeitig ist die Menge langfristig kritischer Umläufe im Verhältnis kleiner. Ab dem Intervall 16:00 bis 17:30 Uhr stehen fünf Busse zur Verfügung, die jeweils mindestens einen kritischen Umlauf ablösen können. Zusätzlich stehen drei Busse für einen Zeitraum von etwa vier Stunden zur Verfügung, bevor sie einen Folgeumlauf übernehmen. Jeder dieser Busse kann einen oder sogar zwei Umläufe ablösen. Die Menge ablösbarer Umläufe ist hier etwas schwerer abzuschätzen, weshalb ein größerer Wertebereich resultiert. Eine Menge von acht bis dreizehn ablösbaren Umläufen erscheint sehr realistisch.

Farblich hervorgehoben sind die Umläufe nach demselben Prinzip wie bei den Gelenkbussen. Es ergeben sich:

- 10 Busse mit bis 2027 kritischen Einsätzen (Orange)
- 2 Busse mit langfristig kritischen Einsätzen (Rot)

Erfahrungsbasiert scheint es möglich, die Umlaufanpassung so auszuführen, dass alle Umläufe ohne einen Fahrzeugmehrbedarf anpassbar sind. Da die Ergebnisse hier jedoch etwas knapper ausfallen als bei den Gelenkbussen, wird ein Fahrzeugmehrbedarf von zwei Solobussen angenommen.

Exkurs Umlaufanpassung Fremdunternehmer

Da die Dekarbonisierung der Fremdunternehmer nicht im Fokus der Betrachtung steht, werden an dieser Stelle nur die Ergebnisse kurz zusammengefasst.

Es werden zwei Gelenkbusumläufe gefahren, die bereits heute als unkritisch eingeordnet werden. Eine Umlaufanpassung ist nicht erforderlich.

Von den vier Solobusumläufen ist nur ein einziger als kritisch bewertet. Dieser kann sehr gut durch das Fahrzeug des sehr kurzen Umlaufs 8033 abgelöst werden, so dass hier kein Mehrbedarf zu erwarten ist.

Von den zwei Midibus-Umläufen sind alle Umläufe heute als kritisch bewertet. Einer der Umläufe ist ab 2028 als machbar klassifiziert. Hier bietet es sich an, die Elektrifizierung möglichst weit zu verzögern. Einerseits, um die technische Entwicklung abzuwarten, aber andererseits aus rein pragmatischen Gründen, um eine Erweiterung des aktuell sehr schmalen Marktangebots abzuwarten. Auch wenn aktuell durchaus kleinere Gefäßgrößen mit batterieelektrischem Antrieb am Markt verfügbar sind, sind diese aktuell eher auf kurze Reichweiten ausgelegt. Modelle mit Batteriekapazitäten über 200 kWh sind bisher eine Marktnische. In jedem Fall sollte ein Mehrbedarf von +1 Midibus berücksichtigt werden.

Technologieempfehlung Fremdunternehmer

Die Technologieempfehlung für eine Dekarbonisierung der fremd betriebenen Umläufe kann bereits an dieser Stelle ausgesprochen werden.

Aufgrund der geringen Anzahl fremd betriebener Umläufe sollte eine möglichst flexible und gleichzeitig kostengünstige emissionsfreie Antriebsalternative umgesetzt werden. Da keine Indikatoren erkennbar sind, die für Wasserstoff als Energieträger sprechen, wird der Einsatz batterieelektrischer Fahrzeuge empfohlen. Dies gilt insbesondere, da am Markt aktuell keine Brennstoffzellen-Midibusse in Deutschland etablierter und verbreiteter Hersteller verfügbar sind.

Für die kleine Busflotte ist der Betrieb einer Schnellladeeinrichtung nicht sinnvoll. Gleichzeitig können alle Umläufe mit einem überschaubaren Mehrbedarf (+1 Midibus) bereits heute machbar gestaltet werden. Sofern eine ausreichende Midibus-Reserve vorgehalten wird, kann dieser Zusatzbus grundsätzlich auch aus der Reserve zeitweise entnommen werden.

Entsprechend wird empfohlen, den Fokus auf batterieelektrische Antriebe mit Nachladung im Depot per CCS-Steckkontakt zu setzen. Diese emissionsfreie Antriebsalternative besitzt aktuell den größten Marktanteil im Bussektor in Deutschland.

1.5.3.2 Umlaufanpassung FCEV Gesamtflotte

Die Treibkraftverbräuche pro Umlauf für FCEV sind an zwei Grenzwerten festgemacht, die eine kleine und große Tankgröße repräsentieren. Selbst wenn die kleine Variante als maßgeblich angesetzt wird, fallen nur vier Gelenkbusumläufe und ein Solobusumlauf in die als kritisch bewertete Menge.

Die Menge ist deutlich kleiner als die für BEV oben zur Optimierung angesetzte Umlaufmenge. Im Umkehrschluss kann abgeleitet werden, dass die **Umlaufanpassung für FCEV ohne Mehrbedarf** erfolgen kann.

1.5.3.3 *Einordnung*

Die obige Berechnung basiert auf konservativen Annahmen und ist entsprechend defensiv ausgelegt. Beispielsweise wird jeder Umlauf als kritisch bewertet, sobald der relevante Grenzwert überschritten wird. Dies erfolgt unabhängig vom Maß der Überschreitung. Gleichzeitig wird für die Abschätzung der Fahrzeugmenge eine Vollladung der Fahrzeugbatterie nach Ablöse unterstellt. In der Praxis wird in vielen Fällen nur eine Teilladung erforderlich sein, so dass der Mehrbedarf auch geringer ausfallen kann als abgeschätzt.

In Anbetracht der ambitionierten geplanten Flottendekarbonisierung bis 2030 ist der zu erwartende Fahrzeugmehrbedarf sehr gering. In Summe wird für die eigenständig betriebenen Umläufe, exklusive MEKS-Busse, nur ein Mehrbedarf von +2 Solobussen erwartet. Um dieses Ziel zu erreichen, ist eine umfangreiche Umlaufanpassung erforderlich. Dies erfordert den Einsatz von Fahrpersonal für die zusätzlichen Transferstrecken, was neben den verbundenen Personalkosten einen zusätzlichen Personalbedarf bedeuten kann.

In Summe liegen hier 31 Umläufe vor, die mit heutiger Technik als nicht machbar gewertet werden. Abhängig von der Umstellungsreihenfolge der einzelnen Einsätze kann die technische Entwicklung im unterschiedlichen Maß genutzt werden, so dass zwischen 20 und 31 Umläufe angepasst werden müssen. Bei einer unterstellten mittleren Transferzeit von 30 Min pro abgelösten Umlauf (2 x 10 Min Transfer und 10 Min Wartezeit am Ablösepunkt) ergibt sich ein Zeitaufwand ca. zwischen 10 und 15 Stunden pro Tag. Auch hier gilt, dass die Abschätzung tendenziell konservativ ausfällt.

Die Variante BEV mit ausschließlicher Depotladung gilt weiterhin als attraktive Dekarbonisierungsoption, da die verbundenen Fahrzeugmehrbedarfe sehr gering sind. Kritisch sind weniger die zusätzlich erforderlichen Fahrzeuge, die gegebenenfalls sogar aus der vorhandenen Fahrzeugreserve entliehen werden können, als die zusätzlichen Personalressourcen. In diesem Fall wird der Personalaufwand großzügig mit etwa einem halben Manntag abgeschätzt.

Auch im Feld der FCEV wurden reichweitenkritische Umläufe identifiziert. Diese können durch Umlaufanpassung vollständig eliminiert werden, ohne einen Fahrzeugmehrbedarf auszulösen. Auch in diesem Fall sind zusätzliche Personalressourcen erforderlich, um die Transferfahrten für die Fahrzeugablösung abzubilden. Der zusätzliche Personalaufwand liegt jedoch unter dem des BEV-Pendants, da weniger Transferfahrten zu erbringen sind. Abhängig von der Tankkapazität sind 3 bis 5 Umläufe anzupassen. Bei einer unterstellten Transferdauer von ca. 30 Minuten ergibt sich ein Zeitaufwand zwischen 1,5 und 2,5 Stunden pro Tag.

Für fremd betriebene Umläufe kann ebenfalls ein sehr geringer Fahrzeugmehrbedarf ermittelt werden, wenn bereits heute eine Vollumstellung erfolgen soll. In diesem Fall ist ein zusätzlicher Midibus wahrscheinlich erforderlich. Es gilt zu prüfen, ob dieser gegebenenfalls aus der Fahrzeugreserve entliehen werden kann, um das notwendige Ladeintervall zu schaffen. Für die fremd betriebenen Umläufe ab Depot FVUI kann an dieser Stelle bereits eine Technologieempfehlung ausgesprochen werden. Da die Dekarbonisierung mit BEV-Depotladern zu einem geringen Fahrzeugmehrbedarf bereits heute machbar ist, sollte diese Antriebstechnik erwogen werden. Im direkten Vergleich zu FCEV ist dies die günstigste Antriebsalternative und erfordert nur den Aufbau von Infrastruktur im Betriebshof.

1.5.4 Schnellladung an ausgewählten Wendestellen

Für batterieelektrische Fahrzeuge besteht die Möglichkeit, Schnellladestationen dezentral an Wendestellen im Liniennetz zu platzieren. In betriebsbedingten Wartezeiten kann den Fahrzeugen Energie zugeführt werden, wodurch die effektive Einsatzreichweite des Fahrzeugs verlängert wird. Dieses Prinzip wird auch im MEKS-Projekt verfolgt, wobei diese Herangehensweise bereits vor Ausführung der Untersuchung in den Förderanträgen des Projekts gesetzt wurde.

Die Fahrzeuge werden mit einem Pantographen ausgestattet, was eine hohe Nachladeleistung an den Wendestellen ermöglicht. Die Fahrzeuge werden dennoch mit einer Energiebatterie ausgerüstet, wie im Depotladungsansatz. Aufgrund des notwendigen Bauraums auf dem Dach muss jedoch eine Reduktion der Batteriekapazität berücksichtigt werden. Für den aktuellen Stand der Technik werden 350 kWh für Solobusse (statt 400 kWh ohne Pantographen) und 400 kWh für Gelenkbusse (statt 470 kWh ohne Pantographen) angesetzt. Jede angenommene Batteriekapazität liegt bei über 300 kWh. Damit kann eine Schnellladung mit 300 kW realisiert werden, ohne überproportionale Alterungseffekte der Traktionsbatterie auszulösen ($C\text{-Rate} \leq 1$).

Um die Schnellladung an Wendestellen zu evaluieren, wurden zunächst alle grundsätzlich in Frage kommenden Wendestellen aus der Umlaufliste extrahiert und der KVG zur Beurteilung vorgelegt. Die möglichen Standorte wurden dahingehend kategorisiert, wie realistisch ein Bau von Schnellladeinfrastrukturen eingeschätzt wird. Für die weitere Betrachtung blieben die Standorte erhalten, die entweder als „realistisch“ (Kategorie 1) oder als „herausfordernd, aber möglich“ (Kategorie 2) eingeschätzt wurden. Alle weiteren Standorte sind nicht Teil der folgenden Erhebung.

Die folgenden Standorte sind Teil der weiteren Betrachtung:

Kategorie 1 („realistisch“):

- Wolfsgaben (WOG)
- Rasenallee (RAS)
- DEZ (DEZ)
- Dörnbergstraße (VNDB)
- Fraunhoferinstitut (FRAU)
- Schulzentrum Brückenhof (SZBR)

Kategorie 2 („herausfordernd, aber möglich“):

- Marienkirche (MARK)
- Bosestraße (STA-BOSE)

Für jeden möglichen Standort wird im Detail untersucht welche Umläufe von einer Schnellladestation am jeweiligen Standort profitieren. Dabei wird ergänzend untersucht, ob bereits das gesamte Energiedefizit des Umlaufs oder ein Teil des Defizits durch die Nachladung kompensiert wird. Durch Gegenüberstellung der Ergebnisse werden zunächst die Standorte identifiziert, die keinen Mehrwert für das Gesamtsystem bieten. Dies sind Standorte, die sich auf dieselben Umläufe auswirken, wie andere Standorte. Sofern die betreffenden Umläufe bereits im ausreichenden Maß von der Nachladung an anderen Standorten profitieren, indem das Energiedefizit vollständig ausgeglichen wird, kann ein Standort als obsolet von der Betrachtung

ausgeklammert werden. Dies betrifft die folgenden Standorte, die nicht weiter Teil der Betrachtung sind:

- DEZ (DEZ)
- Dörnbergstraße (VNDB)
- Schulzentrum Brückenhof (SZBR)

Alle Standorte sind Teil der ersten Kategorie („realistisch“). Es ist also bereits absehbar, dass auch die herausfordernden Standorte der zweiten Kategorie realisiert werden müssen, wenn das Konzept flottenweit verfolgt wird.

Die Auswirkung der Schnellladung an den verbleibenden Standorten wird zweistufig dargestellt. Zunächst werden alle Standorte der ersten Kategorie im Berechnungsprozess mit einer 300 kW Schnellladestation bilanziert. In der zweiten Stufe werden auch die Standorte der zweiten Kategorie hinzugenommen. Um das Optimierungspotenzial plastisch darzustellen, erfolgt die Darstellung im direkten Vergleich zu einem Szenario, bei dem ausschließlich an der Holländischen Straße die Schnellladestation aus MEKS-Projekt berücksichtigt wird.



Abb. 20: Auswirkung der Schnellladung an Wendestellen der Kategorie 1 ("realistisch") - Gelenkbus

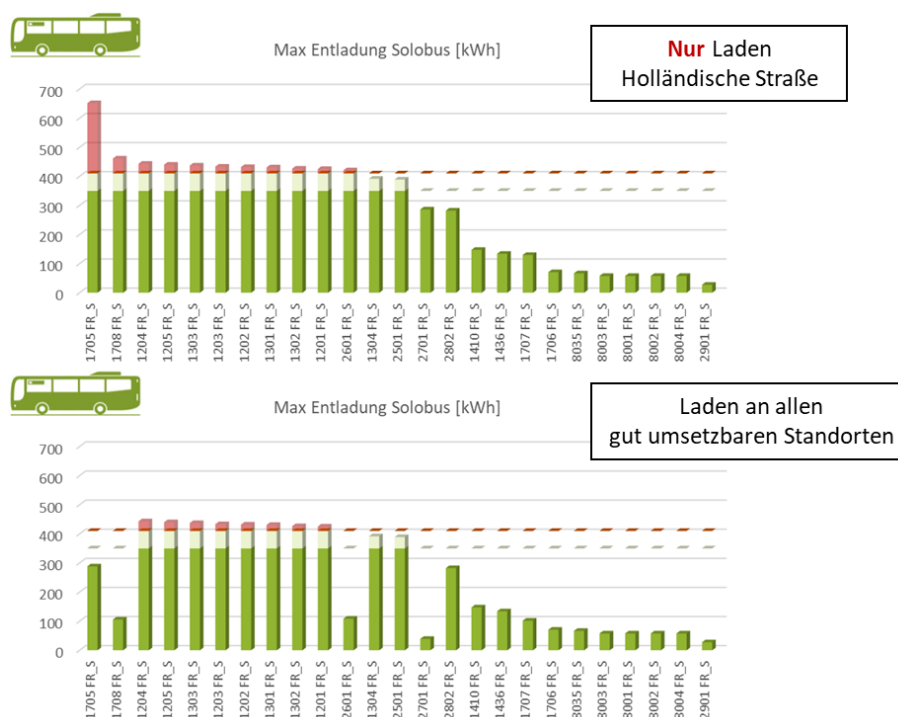


Abb. 21: Auswirkung der Schnellladung an Wendestellen der Kategorie 1 ("realistisch") - Solobus

Wie aus den obenstehenden Abbildungen ersichtlich ist, wirken die Ladepunkte der ersten Kategorie sowohl auf Solo- als auch auf Gelenkbusumläufe.

Hinweis

Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, sind die Umläufe in beiden Bildteilen in derselben Reihenfolge sortiert und nicht nach Größe der maximalen Batterieentladung.

Es gilt zu berücksichtigen, dass nicht der Gesamtenergiebedarf in den Grafiken dargestellt ist, sondern die maximale Batterieentladung. Dieser Wert ist gleichbedeutend mit der notwendigen Batteriekapazität, um den jeweiligen Umlauf inklusive Schnellladung zu erfüllen.

Darüber hinaus ist erkennbar, dass weiterhin langfristig als kritisch bewertete Umläufe, also Umläufe mit rotem Balkenanteil, verbleiben. Es müssen folglich weitere Optimierungsmaßnahmen ergriffen werden, weshalb das Modell um Schnellladungen an Standorten der zweiten Kategorie erweitert wird.

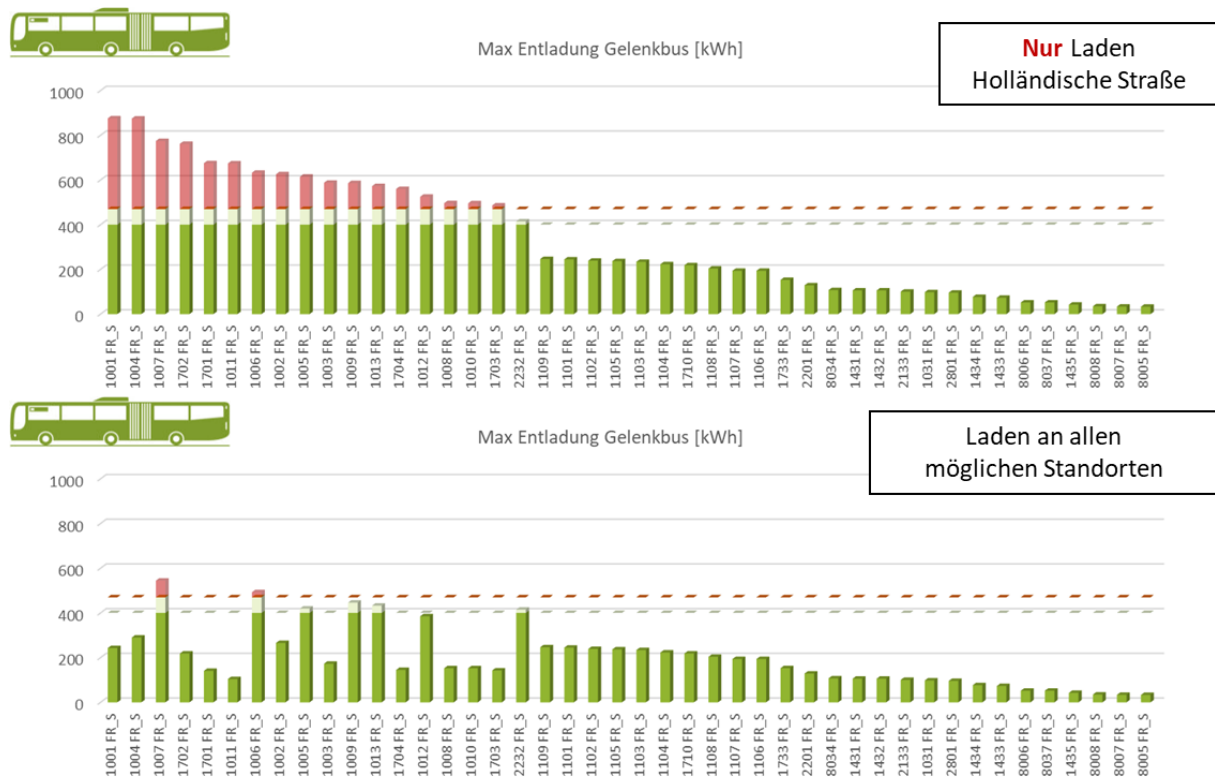


Abb. 22: Auswirkung der Schnellladung an Wendestellen der Kategorie 1 und 2 ("herausfordernd") - Gelenkbus

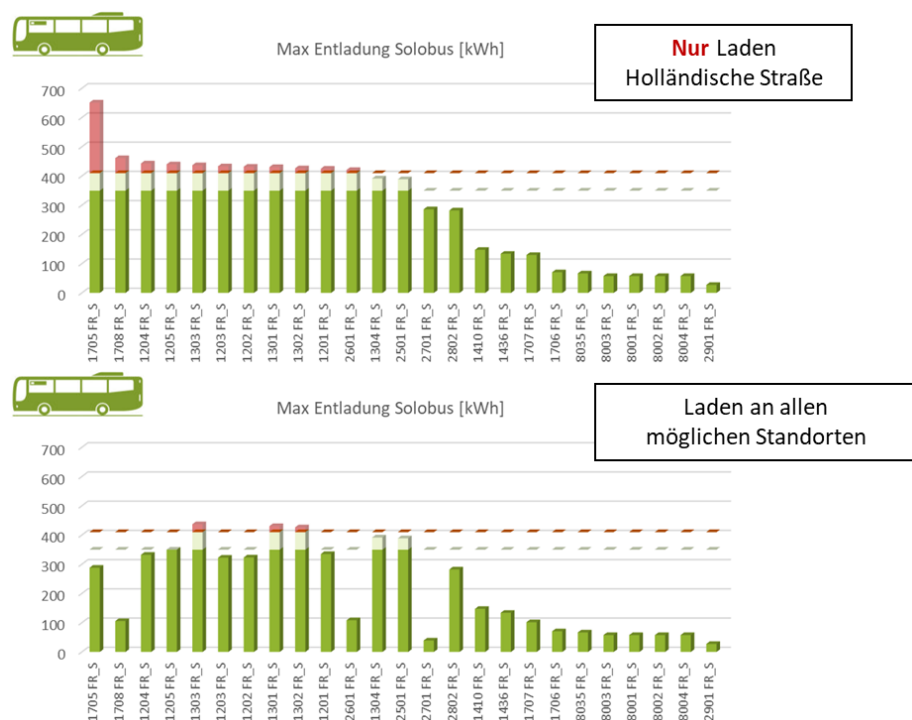


Abb. 23: Auswirkung der Schnellladung an Wendestellen der Kategorie 1 und 2 ("herausfordernd") - Solobus

Bei Betrachtung der Auswirkung zeigt sich, dass nur noch ein sehr geringer Anteil heute und langfristig kritischer Umläufe verbleibt. Dabei wird der Grenzwert ab dem Jahr 2028 nur im geringen Maß überschritten (sehr kleine rote Balkenanteile). Daraus kann abgeleitet werden, dass eine abschließende Umlaufanpassung zwar nicht ausgeschlossen werden kann, diese aber unproblematisch ausfällt. Im Vorgriff auf die weitere Untersuchung kann hier bereits angeführt werden, dass die verbleibende Umlaufanpassung ohne jeglichen Fahrzeugmehrbedarf möglich ist und die zusätzlichen Transferstrecken im sehr überschaubaren Maß anfallen.

1.5.4.1 Einordnung

Die Reichweitenverlängerung durch Schnellladung an ausgewählten Wendestellen stellt eine attraktive Möglichkeit dar, ein BEV-Konzept effektiv zu optimieren. Aufgrund der Nachladung auf Linie müssen die bestehenden Umlaufstrukturen erst angepasst werden, wenn die letzten langfristig kritischen Umläufe dekarbonisiert werden sollen. Durch den Einsatz einer technischen Lösung (Schnellladung) können die Anforderungen an die betriebliche Optimierung (Umlaufanpassung) reduziert werden.

Da die KVG aufgrund des MEKS-Projekts bereits entsprechende Fahrzeugmodelle in den Betrieb bringen wird, hat dieser Optimierungsansatz zusätzlich den Vorteil, dass nur eine einzige Technologievariante im gesamten Betrieb umgesetzt wird. Die Fahrzeuge können beliebig auf den verschiedenen Umläufen eingesetzt werden. Gleichzeitig entfällt ein Großteil der Transferfahrten, die erforderlich sind, falls konsequent auf Umlaufanpassung und Ladung im Depot gesetzt wird.

1.5.5 Vergleich der Alternativen

In Summe stehen drei Technologiealternativen für eine vollständige Flottendekarbonisierung zur Verfügung:

- BEV mit ausschließlicher Depotladung
- BEV mit Depotladung und ergänzender Schnellladung an ausgewählten Wendestellen
- FCEV mit Betankung im Depot

Um diese technisch gleichwertigen Alternativen gegeneinander zu bewerten, muss eine Grobkostenabschätzung erfolgen. Da darüber hinaus weitere Varianten bestehen, werden in Summe sechs Modelle aufgestellt, die kommerziell bewertet werden.

Depotladung mit wenig Mehrbedarf

Dieses Modell entspricht den Berechnungen zur Umlaufanpassung für das BEV mit ausschließlicher Depotladung. Teil des Modells ist ein **Fahrzeugmehrbedarf von +2 Solobussen**. Bedingung ist eine **umfangreiche Umlaufanpassung** inklusive zusätzlicher Personalressourcen.

Depotladung mit viel Mehrbedarf

Dieses Modell entspricht dem vorherigen Modell, das um Sicherheitsfaktoren bei den Fahrzeugmengen erweitert wurde. Teil des Modells ist ein **Fahrzeugmehrbedarf von +4 Solobussen und +2 Gelenkbussen**. Bedingung ist auch hier eine **umfangreiche Umlaufanpassung** inklusive zusätzlicher Personalressourcen.

Zwischenladung mit wenigen Ladepunkten

Im ersten Kostenmodell zur Zwischenladung werden nur drei Ladepunkte der ersten Kategorie berücksichtigt. Dies sind Standorte, die KVG-seitig als „realistisch“ für den Bau einer Schnellladestation eingeschätzt wurden. Teil des Modells sind **drei zusätzliche Schnellladestationen** der ersten Kategorie. Bedingung ist eine **Umlaufanpassung mittleren Umfangs** inklusive **zusätzlicher Personalressourcen**.

Zwischenladung mit vielen Ladepunkten

Das Modell entspricht dem vorherigen, wobei zwei zusätzliche Schnellladepunkte an Standorten der zweiten Kategorie („herausfordernd, aber möglich“) berücksichtigt werden. Teil des Modells sind **drei zusätzliche Schnellladestationen** der ersten Kategorie sowie **zwei zusätzliche Schnellladestationen** der zweiten Kategorie. Bedingung ist eine **geringfügige Umlaufanpassung** inklusive zusätzlicher Personalressourcen im geringen Umfang.

Wasserstoff grün (Kauf)

Basis des Modells ist eine Umstellung auf Brennstoffzellenfahrzeuge, die hier global emissionsfrei mit grünem Wasserstoff betrieben werden. Für den Bezug von grünem Wasserstoff wird ein optimistischer Preisrahmen angesetzt. Im Modell sind keine Zusatzaufwendungen berücksichtigt, da diese nicht erforderlich sind. Bedingung ist eine **geringfügige Umlaufanpassung** inklusive zusätzlicher Personalressourcen im geringen Umfang.

Wasserstoff Türkis (Kauf)

Dieses Modell entspricht exakt dem Vorgänger, mit der Ausnahme, dass hier emissionsbehafteter türkiser Wasserstoff als Energieträger berücksichtigt wird. Für den Bezug von türkischem Wasserstoff wird ein optimistischer Preisrahmen angesetzt. Im Modell sind keine Zusatzaufwendungen berücksichtigt, da diese nicht erforderlich sind. Bedingung ist eine **geringfügige Umlaufanpassung** inklusive zusätzlicher Personalressourcen im geringen Umfang.

1.5.5.1 *Angesetzte Kostenprämissen*

Um die herstellerepezifischen Preisschwankungen in die Berechnungen einfließen zu lassen, wurden für alle Investitionen Kostenrahmen von einem Minimal- bis zu einem Maximalwert angesetzt. Im Werteverlauf wurde jeweils ein Erwartungswert angesiedelt, der dem „typischen“ Wert der Komponente in der Anschaffung entspricht.

Angesetzt werden marktübliche Preise, ohne auf die konkreten Fahrzeugkosten des MEKS-Projektes zurückzugreifen. Grund hierfür ist die Vergleichbarkeit der Kosten. Während für Batteriebusse mit Pantographen konkrete Kostenwerte aus dem MEKS-Projekt vorliegen (SL: 661 T€; GL: 849 T€), ist dies für BEV mit Depotladung und insbesondere FCEV nicht der Fall. Gleichzeitig haben Busse mit alternativen Antrieben keinen fest definierten Standardpreis und sind nicht zuletzt abhängig von sekundären Faktoren, wie der Innenraumausstattung und anderen anwendungsspezifischen Details. Um die Relation der Kosten untereinander belastbar darzustellen, muss auf eine Anwendung zurückgegriffen werden, bei der alle drei Antriebsvarianten in demselben Betriebsgebiet eingesetzt werden.

Um dies zu gewährleisten, sind die Kosten hier an ersten Ergebnissen der Begleitforschung zu dem noch laufenden Förderprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare

Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV)⁶ angelehnt. Hier wird eine Vielzahl von Förderprojekten inklusive der verbundenen Anschaffungskosten ausgewertet. Auch wenn die absoluten Werte von den Beschaffungspreisen in Kassel abweichen, ist die Relation der Kosten zueinander belastbar und für den Variantenvergleich geeignet.

Theoretisch könnten auch konkrete Beschaffungspreise aus anderweitigen Projekten angesetzt werden. In der Praxis ist dies jedoch nicht möglich, da kein Projekt bekannt ist, bei dem alle drei Antriebsvarianten beschafft wurden. Der Ansatz über die mittleren Kosten aus der Begleitforschung zu dem laufenden Förderprogramm des BMUV bzw. BMWK stellt die beste Alternative dar, typische Marktpreise in die Betrachtung aufzunehmen.

<i>Kostenprämissen Fahrzeuge</i>				
<i>Position</i>	<i>Minimalwert</i>	<i>Erwartungswert</i>	<i>Maximalwert</i>	<i>Anmerkung</i>
Bus Batterie CCS 12 m	520.000 €	550.000 €	580.000 €	
Bus Batterie CCS 18 m	705.000 €	735.000 €	765.000 €	
Bus Batterie Pantograph 12 m	545.000 €	575.000 €	605.000 €	
Bus Batterie Pantograph 18 m	730.000 €	760.000 €	790.000 €	
Bus Brennstoffzelle 12 m	620.000 €	650.000 €	680.000 €	
Bus Brennstoffzelle 18 m	790.000 €	820.000 €	850.000 €	

Tab. 1: Kostenprämissen Fahrzeuge

⁶ Das Förderprogramm wurde zwischenzeitlich vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) übernommen.

Kostenprämissen Infrastruktur				
Position	Minimalwert	Erwartungswert	Maximalwert	Anmerkung
Depot Ladeinfrastruktur „CCS“	65.000 €	75.000 €	85.000 €	Durchschnittspreis pro Ladepunkt / Bus
Depot Ladeinfrastruktur „Pantograph“	45.000 €	55.000 €	65.000 €	Preis pro Ladepunkt (reduzierte Leistung wg. Ladung „auf Linie“)
H ₂ Tankanlage	900.000 €	1.000.000 €	1.100.000 €	Durchschnittspreis für ca. 11 Busse
Schnellladestation im Liniennetz	300.000 €	400.000 €	500.000 €	Preis pro Station

Tab. 2: Kostenprämissen Infrastruktur

Treibkraftkosten wurden der Komplexität halber mit einem festen Wert beziffert. Wie im Folgenden ersichtlich wird, sind die Abweichungen hier so deutlich, dass ein Werteverlauf überflüssig ist.

Kostenprämissen Treibkraft				
Position	Minimalwert	Erwartungswert	Maximalwert	Anmerkung
Elektrische Energie	--	0,31 €/kWh	--	Pessimistische Annahme. Preisentwicklung aktuell ↗ (<0,30 €/kWh)
Grüner Wasserstoff	--	10,0 €/kg H ₂	--	Mittlere Annahme. Kostenrahmen (beigestellt): Ca. 8 bis 12 €/kg H ₂
Türkiser Wasserstoff	--	7,0 €/kg H ₂	--	Mittlere Annahme. Kostenrahmen (beigestellt): Ca. 6-8 €/kg H ₂

Tab. 3: Kostenprämissen Treibkraft

Hinweis

Da FCEV-Anwendungen erfahrungsgemäß kostenintensiver ausfallen als BEV-Anwendungen, wurden hier tendenziell optimistische Preisrahmen für Wasserstoff als Energieträger angesetzt. Ziel ist es, damit auch günstige Beschaffungsoptionen in die Bewertung einzubinden.

Die Bewertung wird auf die wesentlichen Kostentreiber beschränkt, die im Rahmen einer groben Kostenrechnung hinreichend belastbar beziffert werden können. Faktoren wie zusätzliches Personal für Transferstrecken können an dieser Stelle nicht mit einem Zahlenwert berücksichtigt werden, da diese erst nach Ausführung der Umlaufanpassung bekannt sind.

1.5.5.2 Grobkostenvergleich

Beim Vergleich der Grobkosten werden zunächst die Investitionskosten für Fahrzeuge und Infrastruktur miteinander in Kontext gesetzt. Der hellgrüne Teilbalken stellt dabei den Preisverlauf von minimal bis maximal dar. Über die gelbe Raute wird der Erwartungswert dargestellt.

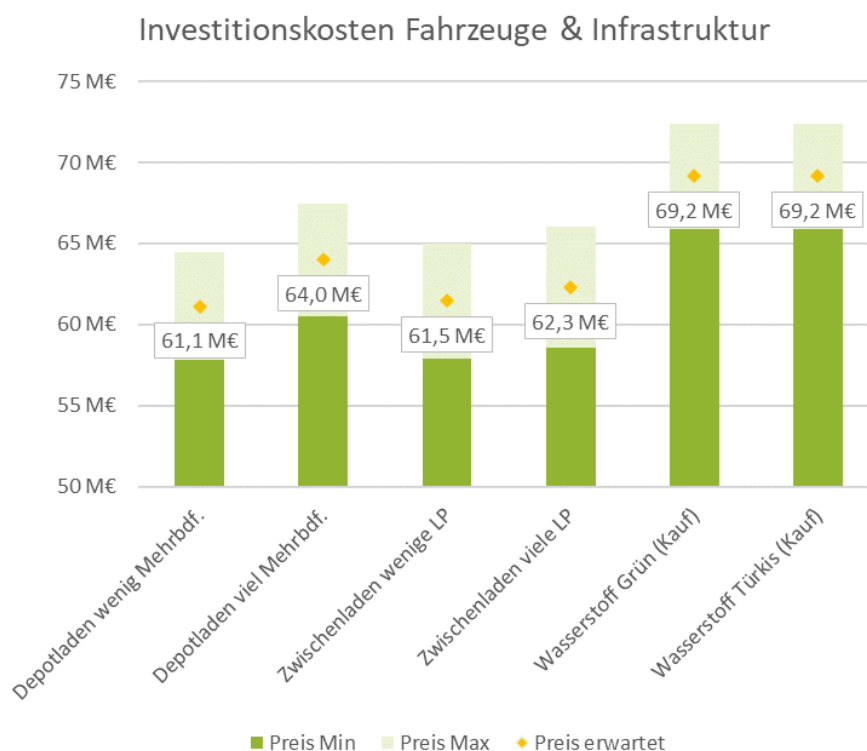


Abb. 24: Investitionskosten Fahrzeuge und Infrastruktur

Es ist ersichtlich, dass die Kostenstruktur in zwei Gruppen aufgeteilt werden kann, die sich in einem ähnlichen Preisrahmen bewegen. Die vier BEV-Modelle auf der linken Seite der Grafik rangieren deutlich unter den Kostenwerten der FCEV-Modelle auf der rechten Seite. Darüber hinaus liegen die Kostenwerte für BEV-Modelle sehr nah beieinander.

Die wichtigsten BEV-Modelle, Depotladen mit wenig Mehrbedarf (ganz links) und Zwischenladen mit vielen Ladepunkten (4. Balken v.l.), sind mit einem Erwartungswert von 61,1 M€ beziehungsweise 62,3 M€ beziffert. Auch wenn dies einen leichten Vorteil für BEV mit Depotladung suggeriert, muss der Wertebereich der Kostenprämissen berücksichtigt werden. Bereits kleinere Abweichungen bei den Fahrzeugkosten können dazu führen, dass sich die Investitionskosten der Modelle merklich ändern. Bei Betrachtung des gesamten Wertebereichs von minimal nach maximal ist ersichtlich, dass sich diese für die beiden BEV-Hauptmodelle über weite Strecken überschneiden. Beide Modelle werden hier im Rahmen der Berechnungsgenauigkeit als gleichwertig gewertet. Die marginalen Vorteile der Depotladungsvariante sollten im Kontext der Berechnungsgenauigkeit nicht überbewertet werden.

FCEV-Modelle sind in jedem Fall deutlich kostenaufwendiger bewertet als BEV Modelle. In den meisten Fällen rangiert der komplette Kostenrahmen über denen der BEV-Modelle. Selbst wenn

für FCEV nur Minimalwerte und für BEV nur Maximalwerte angesetzt würden, wäre der Investitionsaufwand für FCEV nur in Einzelfällen geringer als für BEV-Modelle.

Dieser Umstand wird weiter verschärft, wenn die Treibkraftkosten mit in die Betrachtung aufgenommen werden. Selbst wenn für H₂ optimistische Kostenwerte angesetzt werden, besteht eine deutliche Abweichung von fast 10 M€ zwischen dem Einsatz elektrischer Energie und türkischem Wasserstoff über einem 10-jährigen Zeitraum. Grüner Wasserstoff rangiert deutlich höher und verursacht mehr als doppelt so hohe Kosten wie grüner Strom als Treibkraft, was aus folgender Abbildung ersichtlich wird.

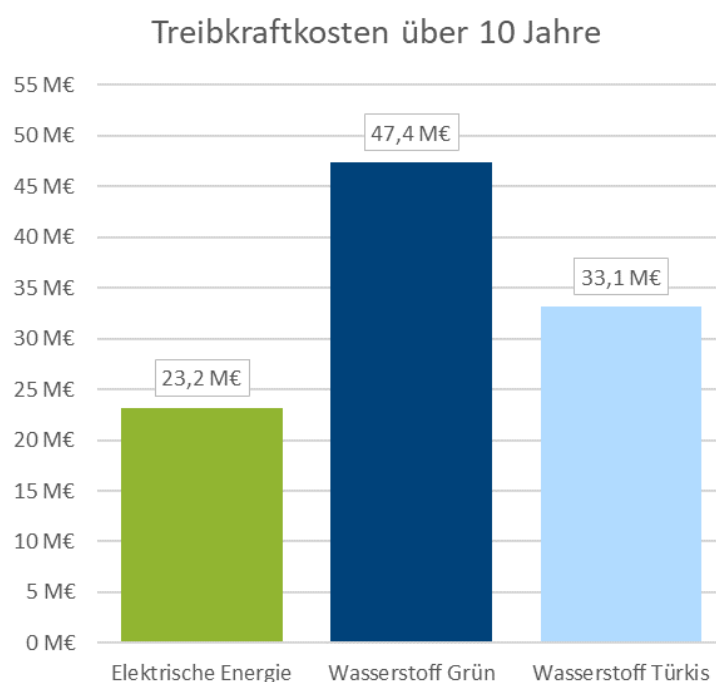


Abb. 25: Treibkraftkosten über 10 Jahre (H₂ Kosten entspr. Kostenprämissen)

Um hier auch den Extremfall abzudecken, werden für Wasserstoff in der folgenden Grafik jeweils die beigestellten Minimalkosten angesetzt (8 €/kg H₂ für grünen Wasserstoff und 6 €/kg H₂ für türkisen Wasserstoff). Dabei gilt zu beachten, dass entsprechende Preise deutlich unter den üblichen Kostenprognosen für Wasserstoff rangieren. Es steht die Befürchtung im Raum, dass die zu erwartende Nachfrage nach Wasserstoff aus Industrie und anderen Mobilitätssektoren die Preise für Wasserstoff über den Erwartungshorizont nach oben treibt. Im Gegensatz zur örtlich gebundenen Mobilität im ÖPNV gilt Wasserstoff für Teile der Industrie und ortsflexiblen Mobilität (auch Luftverkehr) als alternativloses Element der anstehenden Energiewende in diesen Sektoren.

Jedoch auch unter diesen extremen Kostenannahmen bleibt der Unterschied deutlich ausgeprägt. Insbesondere grüner Wasserstoff bedeutet mehr als 60 % Zusatzkosten pro Jahr.

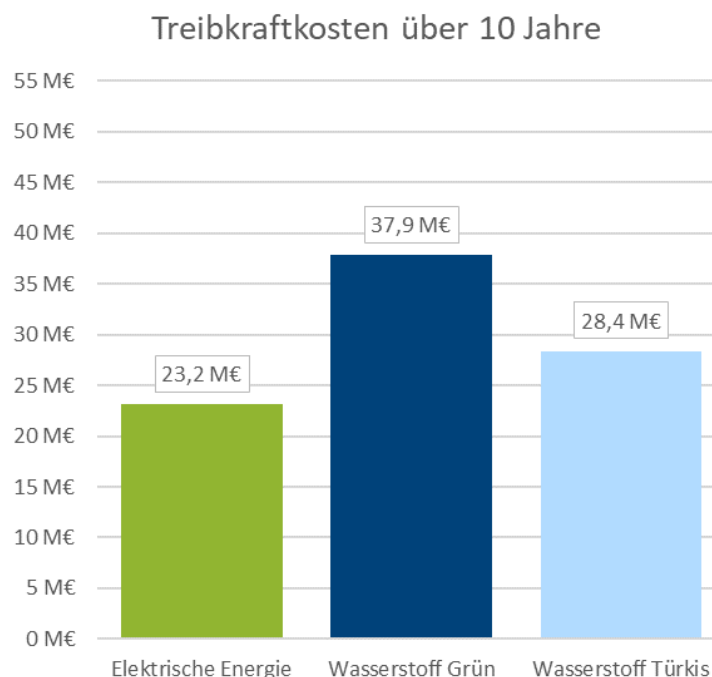


Abb. 26: Treibkraftkosten über 10 Jahre (H₂ Kosten sehr optimistisch)

Auf Basis der Grobkostenberechnung kann festgehalten werden, dass FCEV modellunabhängig die kostenaufwendigere Alternative darstellen. BEV-Modelle rangieren im Rahmen der Berechnungsungenauigkeit nahezu auf Augenhöhe, so dass hier keine eindeutige Tendenz abgeleitet werden kann. Die Ansätze BEV mit Depotladung und intensiver Umlaufanpassung sowie BEV mit Zwischenladung an fünf zusätzlichen Schnellladestationen sind hier als gleichwertig bewertet.

1.5.5.3 Empfehlung einer Vorzugstechnologie

Die Anwendung von Optimierungsmaßnahmen kann nicht vermieden werden, wenn eine Flottenumstellung bis 2030 erfolgen soll. Die monetäre Bewertung der Investitionskosten erfolgt inklusive Zusatzaufwendungen wie Schnellladestationen oder einem möglichen Fahrzeugmehrbedarf auf BEV-Seite. Trotz des Umstands, dass für FCEV keine Zusatzfahrzeuge erforderlich sind und nur eine geringfügige Umlaufanpassung notwendig ist, liegen die erwarteten Kosten deutlich über sämtlichen BEV-Ansätzen, so dass FCEV als Vorzugstechnologie nicht empfohlen wird.

Die Vor- und Nachteile werden im direkten Vergleich ersichtlich

<i>BEV Depotladen</i>	<i>BEV Zwischenladen</i>	<i>FCEV</i>
Kostenprognose		
Tiefes Preisniveau im direkten Vergleich	Tiefes Preisniveau im direkten Vergleich	Hohes Preisniveau im direkten Vergleich
Einschätzung Treibkraft		
Strom als Treibkraft ist sicher verfügbar und vergleichsweise gut kommerziell bewertbar	Strom als Treibkraft ist sicher verfügbar und vergleichsweise gut kommerziell bewertbar	Wasserstoff als Treibkraft beruht langfristig auf Prognosen. Nachfragekonkurrenz (z.B. Stahlindustrie) kann sich stark negativ auswirken
Einschätzung Lade- / Tankinfrastruktur im Depot		
Umfangreiche Ladeinfrastruktur mit leicht erhöhter Durchschnittsleistung („zu installierende kW pro Bus“), aber sehr gut skalier- und integrierbar	Umfangreiche Ladeinfrastruktur mit leicht reduzierter Durchschnittsleistung („zu installierende kW pro Bus“), aber sehr gut skalier- und integrierbar	Tankinfrastruktur benötigt große zusammenhängende Flächen. Modellabhängig kann el. Ladeinfrastruktur auch zusätzlich erforderlich sein
Einschätzung Ladeinfrastruktur auf Linie		
Nicht erforderlich	Zusätzliche fünf Schnellladestationen erforderlich (Planung, Genehmigung, Bau)	Nicht erforderlich
Betriebliche Anpassung		
Umfangreiche Umlaufanpassung notwendig	Geringe Umlaufanpassung notwendig	Geringe Umlaufanpassung notwendig
Fahrzeugmehrbedarf		
Abhängig von Umlaufanpassung. Erwartet +2 Solobusse	Kein Mehrbedarf erwartet.	Kein Mehrbedarf erwartet.
Zusätzlicher Personalbedarf		
Transferfahrer für Verbringung Springerbus	Kein Mehrbedarf erwartet, jedoch zusätzliche Aufwendungen (Transfer) für bestehendes Personal im überschaubaren Umfang	Kein Mehrbedarf erwartet, jedoch zusätzliche Aufwendungen (Transfer) für bestehendes Personal im überschaubaren Umfang
Flottenstruktur		
BEV als Hauptvariante mit zwei Unterkategorien - BEV Pantograph (MEKS) - BEV CCS	Einzelne Variante BEV Pantograph	Zwei Haupt-Varianten - BEV Pantograph (MEKS) - FCEV
Markteinschätzung		
Größtes Marktangebot im Bereich alternative Antriebe für alle Fahrzeuggrößen	Gutes Marktangebot für Solo- und Gelenkbusse. Kleines Angebot für Midibusse und kein Angebot für Kleinbusse	Keine Serienmodelle führender Hersteller abseits Solo- / Gelenkbusse. Überschaubares Marktangebot insgesamt

<i>BEV Depotladen</i>	<i>BEV Zwischenladen</i>	<i>FCEV</i>
Sonstige Pro Argumente		
	Energiemenge wird teilweise abseits Depots umgesetzt (reduzierte Netzanforderung Depot)	
Sonstige Contra Argumente		
Manuelle Schnittstellenbetätigung durch Fahrer erforderlich	Langfristig kann Zwischenladen „überholt“ sein (lange Reichweiten auch ohne Zwischenladen). Technik kann jedoch weiter betrieben werden.	Schlechter Gesamtwirkungsgrad „Well-to-Wheel“

Grundsätzlich ist es denkbar FCEV als zusätzliche Antriebstechnik in die Flotte aufzunehmen, wenn gewünscht. Jedoch sind keine Indikatoren erkennbar, die dies als notwendig auszeichnen würden. Insbesondere, da ein hohes Potenzial zur Umlaufanpassung vorliegt, können auch sehr herausfordernde Einsätze mit BEV gelöst werden. Auch der Einsatz von FCEV als Härtefalllösung ist aus diesem Grund nicht sinnvoll. Es wird als sinnvoller erachtet, eine einzige Technologieform einzuführen.

Die verbleibenden BEV-Alternativen unterscheiden sich hinsichtlich des primären Optimierungsansatzes und damit auch hinsichtlich der technischen Ausführung der Fahrzeuge. Auf der einen Seite steht der ‚klassische‘ BEV-Ansatz mit ausschließlicher Depotladung per CCS-Steckkontakt. Dieser Ansatz stützt sich auf eine intensive Umlaufanpassung. Auch wenn der erwartete Fahrzeugmehrbedarf sehr gering ausfällt, muss hier berücksichtigt werden, dass ein zusätzlicher Personalaufwand entsteht. Aufgrund der Umlaufanpassung müssen Busse in Leerfahrten zwischen Depot und Ablösepunkten bewegt werden. Um den Personalaufwand konkret zu beziffern, müsste die Umlaufanpassung durchgeführt werden. Auch wenn hier keine konkrete Wertangabe erfolgen kann, kann der Zeitaufwand zumindest grob abgeschätzt werden.

In Summe liegen 31 Umläufe vor, die mit heutiger Technik als nicht machbar gewertet werden. Abhängig von der Umstellungsreihenfolge der einzelnen Einsätze kann die technische Entwicklung im unterschiedlichen Maß genutzt werden, so dass zwischen 20 und 31 Umläufe angepasst werden müssen. Bei einer unterstellten mittleren Transferzeit von 30 Min pro abgelösten Umlauf (2 x 10 Min Transfer und 10 Min Wartezeit am Ablösepunkt) ergibt sich ein Zeitaufwand ca. zwischen 10 und 15 Stunden pro Tag. Auch hier gilt, dass die Abschätzung tendenziell konservativ ausfällt.

Auf der anderen Seite steht ein Ansatz, der sich auf Schnellladepunkte für BEVs an Wendestellen stützt. Die Fahrzeuge sind zusätzlich mit einem Pantographen ausgestattet, was eine kleinere Batteriedimensionierung nach sich zieht. Eine Umlaufanpassung ist auch in diesem Modell erforderlich, jedoch in einem wesentlich geringeren Umfang, da nur einzelne Umläufe angepasst werden müssen. Die Anpassung kann ohne Fahrzeugmehrbedarf erfolgen. Die Anzahl zusätzlicher Transferstrecken ist deutlich kleiner. Es ist anzunehmen, dass dieser Zusatzaufwand mit der bestehenden Personaldecke gestemmt werden kann.

Die Entscheidung zwischen beiden Technologiealternativen geht letztlich auf sekundäre Argumente zurück. Beide Varianten können auf Basis der bisherigen Analyseschritte als gleichwertig empfohlen werden.

Die Auswahl einer Vorzugstechnologie erfolgte durch die KVG im Rahmen einer Abstimmungsrunde auf Basis der bisherigen Ergebnisse. Ausgewählt wurde die BEV Variante mit Zwischenladung und fünf zusätzlichen Ladepunkten. Drei der Ladepunkte fallen unter die erste Kategorie (Realisierung eingeschätzt als „realistisch“), während zwei Ladepunkte in die zweite Kategorie („herausfordernd aber möglich“) fallen. Die letztlich ausschlaggebenden Argumente sind hier zusammengefasst:

- Die Umlaufanpassung für BEV mit Zwischenladung kann im geringeren Umfang erfolgen und zieht insbesondere weniger Personalaufwand nach sich. Auch wenn zusätzliche Arbeitsstunden für Transferstrecken anfallen, ist anzunehmen, dass kein zusätzliches Personal eingestellt werden muss
- Die Depotladeinfrastruktur wird mit Hinblick auf die technische Entwicklung nicht zu klein dimensioniert, um langfristig (Horizont ab 2040) bei Bedarf auf eine Depotladung umsteigen zu können. Dennoch wirkt sich die teilweise Energiezuführung im Liniennetz positiv auf die erforderliche Netzlast im Depot aus.
- Die Gesamtflotte basiert auf einem einzigen Fahrzeugtyp, was Vorteile bei der Fahrzeugdisposition, Wartung und Instandhaltung bedeuten kann.
- Die Bedienung der Ladeschnittstelle (Pantograph) erfolgt automatisch. Die Nachladung erfolgt auch im Depot per Pantograph bei reduzierter Ladeleistung. Einerseits sinkt damit die Anforderung an das Fahrpersonal und andererseits wird der Faktor Mensch als mögliche Fehlerquelle ausgeschlossen.

Den Pro-Argumenten stehen zwei Contra-Argumente entgegen.

- Der Aufbau von Infrastruktur außerhalb des Depots bedeutet einen zusätzlichen planerischen und baulichen Aufwand. Insbesondere im städtischen Bereich kann die Installation aufwendig sein. Aufgrund der Erfahrungen im MEKS-Projekt schätzt die KVG diesen Faktor jedoch als beherrschbar ein.
- Langfristig wird eine weitere technische Entwicklung der Batterietechnik erwartet. Es ist anzunehmen, dass aufgrund steigender Kapazitäten in den nächsten Dekaden eine wesentlich größere Anzahl Umläufe ohne Zwischenladen machbar ist. Möglicherweise wird die Zwischenladung langfristig obsolet, wenn die Kapazitäten der Batterien weiter ansteigen. Dennoch ist über eine realistische Lebensdauer der Ladeinfrastruktur (20 bis 25 Jahre) anzunehmen, dass die Technik ihre Daseinsberechtigung aufweist. Es wird als realistisch angenommen, dass in folgenden Fahrzeuggenerationen auch Modelle mit kleinerer Batteriekapazität (Vergleichbar mit aktuellen Werten) und Pantograph angeboten werden. Diese würden eine höhere Passagierkapazität ermöglichen und vermutlich zu attraktiven Preisen verfügbar sein.

1.6 AP 1.6 Erstellung eines Umlaufkonzepts auf Basis der Bewertungen der bestehenden Umläufe

Die Umlaufverknüpfung erfolgte bereits für den Status Quo in Kapitel 1.4.3 *Umlaufverknüpfung* ab Seite 16.

Die gewählte Vorzugstechnologie (BEV mit Zwischenladung) kann mit demselben Umlaufkonzept betrieben werden, das auch dem heutigen Dieselbusbetrieb entspricht. Wie im folgenden AP

diskutiert, muss die Ladeinfrastruktur sukzessive aufgebaut werden, um passend zu den Beschaffungsplänen unkritische Umläufe in den erforderlichen Mengen zu gewährleisten. Erst nach Installation aller Ladepunkte muss eine Umlaufanpassung für die letzten verbleibenden kritischen Umläufe erfolgen. Da hier nur bestehende Umläufe getrennt und durch Wechselfahrzeuge abgelöst werden, wobei der Linienfahrer das Fahrzeug am Wendepunkt tauscht, kann auch hier die Umlaufstruktur beibehalten werden.

1.7 AP 1.7 Bewertung der Konzeptionsanalysen und Erstellung eines neuen Umlaufplans für ein exemplarisches Verkehrsmodell

Aufgrund der zusätzlichen Einführung von Schnellladestationen kann die Notwendigkeit einer Umlaufanpassung zeitlich verzögert werden. Im Vordergrund steht hier zunächst die Frage, wann welche Ladepunkte installiert werden können.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets werden Begriffe eingeführt, die für die Darstellung eines Umstellungsplans sinnvoll sind.

- Einsatzflotte: Berechnete Fahrzeuganzahl zur Erfüllung der betrachteten Umläufe. Die Gesamtflotte setzt sich zusammen aus der Einsatzflotte und der Reserveflotte.
- Einsatzpotenzial: Ein Fahrzeugtagesumlauf, der zu einem gewissen Zeitpunkt als machbar klassifiziert wird, entspricht einem Einsatzpotenzial für einen Bus. Dabei sind alle Einzelumläufe unkritisch und die Nachladung (im Depot zwischen zwei Umläufen oder auf Linie) kann im ausreichenden Maß erfolgen.
- Lang- und Kurzfahrten: Langfahrten starten am Morgen und enden erst zum Ende des Betriebstages. Dem gegenüber stehen Kurzfahrten, die nur in Spitzenlastzeiten betrieben werden und lediglich für wenige Stunden andauern. Es wird im Folgenden angenommen, dass neue E-Busse verstärkt auf Langfahrten eingesetzt werden sollen.

Hier wird die laufende Beschaffung des MEKS-Projektes von der Betrachtung ausgeschlossen. Die erforderliche Schnellladestation an der Holländischen Straße wird als vorhanden angenommen. Die erste Systemeinführung im Rahmen des MEKS-Projektes wird hier insgesamt als abgeschlossen betrachtet. Im Fokus stehen alle weiteren Beschaffungen ab 2025.

Hinweis

Hier wird verschärfend angenommen, dass jeder beschaffte E-Bus Teil der Einsatzflotte sein soll. In der Praxis ist davon auszugehen, dass zumindest einzelne Fahrzeuge der Reserve zuzuordnen sind. Entsprechend besteht in der Praxis ein geringfügig höheres Potenzial, um Fahrzeuge in die Flotte zu integrieren als unterstellt.

Zur Beantwortung der Frage, wann Schnellladestationen an welchem Standort erforderlich sind, werden zunächst drei Ausbaustufen festgelegt, die im Folgenden auch als LIS-Stufen⁷ bezeichnet werden:

- LIS-Stufe 0:
Angesetzte Basisstufe nach Inbetriebnahme der Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur des MEKS-Projektes. Die Stufe beinhaltet eine Schnellladestation:
 - Holländische Straße mit 300 kW Ladeleistung
- LIS-Stufe 1:
Erweiterung um drei zusätzliche Schnellladestationen der ersten Kategorie (Realisierungseinschätzung „realistisch“). Die Stufe beinhaltet vier Schnellladestationen:
 - Holländische Straße mit 300 kW Ladeleistung
 - Wolfsgraben mit 300 kW Ladeleistung
 - Rasenallee mit 300 kW Ladeleistung
 - Fraunhoferinstitut mit 300 kW Ladeleistung
- LIS-Stufe 2:
Zweite Erweiterung um zwei zusätzliche Schnellladestationen der zweiten Kategorie (Realisierungseinschätzung „herausfordernd, aber möglich“). Die Stufe beinhaltet sechs Schnellladestationen:
 - Holländische Straße mit 300 kW Ladeleistung
 - Wolfsgraben mit 300 kW Ladeleistung
 - Rasenallee mit 300 kW Ladeleistung
 - Fraunhoferinstitut mit 300 kW Ladeleistung
 - Marienkirche mit 300 kW Ladeleistung
 - Bosestraße mit 300 kW Ladeleistung

1.7.1 Übersicht der Einsatzpotenziale

Zwei Faktoren beeinflussen die Anzahl der machbaren Fahrzeugeinsätze der KVG-Flotte: Die technische Entwicklung und die Anzahl der verfügbaren Schnelllader.

Da erst im Laufe der Bearbeitung ersichtlich wird, wann Schnellladepunkte erforderlich sind, kann hier noch nicht festgelegt werden, welche technische Entwicklung unterstellt werden kann. Das Prognosemodell beinhaltet einen Entwicklungssprung im Jahr 2028. Abhängig, ob die Ladepunkte

⁷ LIS = Ladeinfrastruktur

vor oder nach dem Technologiesprung erforderlich sind, können abweichende Batteriekapazitäten unterstellt werden. Größere Kapazitäten weisen dabei größere Mengen machbarer Einsätze auf.

Übersicht Einsatzpotenzial BEV Bus mit Zwischenladung im LIS-Stufenmodell						
	LIS-Stufe 0		LIS-Stufe 1		LIS-Stufe 2	
	Bis 2027	Ab 2028	Bis 2027	Ab 2028	Bis 2027	Ab 2028
<i>Solobusse</i>						
Langfahrten	6	8	9	11	13	16
Kurzfahrten	1	1	1	1	1	1
Summe	7	9	10	12	14	17
<i>Gelenkbusse</i>						
Langfahrten	2	3	11	12	14	18
Kurzfahrten	10	10	10	10	10	10
Summe	12	13	21	22	24	28

Tab. 4: Übersicht Einsatzpotenziale BEV Bus mit Zwischenladung im LIS-Stufenmodell

1.7.2 Erläuterung der Grafiken

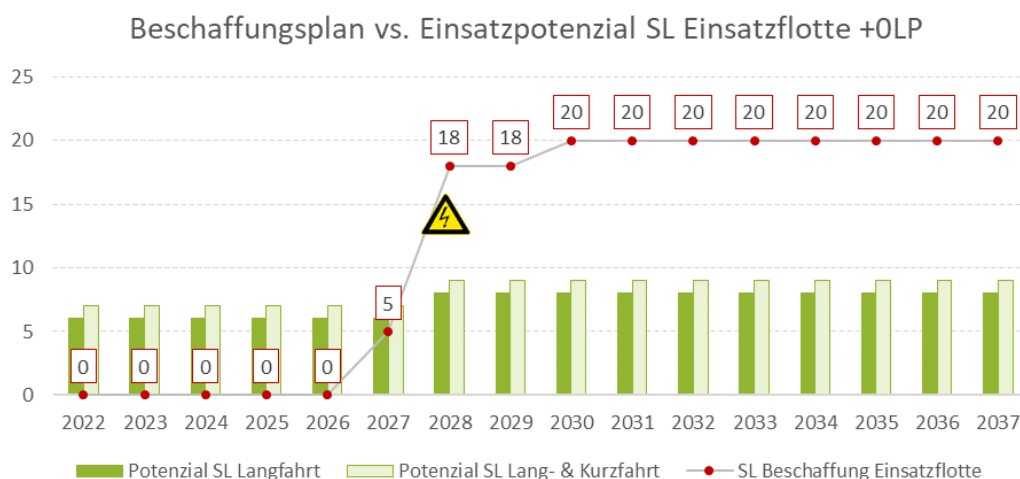


Abb. 27: Beschaffungsplan vs. Einsatzpotenzial Solobus in LIS-Stufe 0 (hier als Beispiel zur Erläuterung)

In den folgenden Grafiken sind über der Zeit (X-Achse) die Einsatzpotenziale als Balken aufgezeichnet. Dabei wird zwischen ausschließlichen Langfahrten und der Summe aus Lang- und Kurzfahrten unterschieden. Primär sollen die Fahrzeuge auf Langfahrten eingesetzt werden, weshalb dieser dunkel eingefärbte Balken maßgeblich ist. Da die Darstellung pro LIS-Stufe erfolgt, wechselt das Einsatzpotenzial nur im Jahreswechsel 2028, da hier ein Entwicklungssprung der Batterietechnik unterstellt ist.

Die Darstellung wird mit dem geplanten Aufbau der Einsatzflotte überlagert (Liniengraph). Es wird unterstellt, dass jeder neu beschaffte Bus in die Einsatzflotte überführt wird. Wenn der

Maximalwert (20 Solobusse beziehungsweise 30 Gelenkbusse) erreicht wird, wurden so viele neue Busse beschafft, dass die gesamte Einsatzflotte mit E-Bussen betrieben werden kann⁸ und die Kurve stagniert. Alle weiteren Fahrzeugbeschaffungen werden der Fahrzeugreserve oder dem turnusmäßigen Fahrzeugtausch zugeordnet.

Solange die beschafften Fahrzeuge in die Einsatzflotte integriert werden können, rangiert der Liniengraph „Beschaffung Einsatzflotte“ innerhalb der Fläche, die von den Balken überspannt wird. Das Einsatzpotenzial ist größer oder gleich der antizipierten Einsatzflotte. Wenn die Einsatzflotte über den Balkendarstellungen verläuft, werden mehr Fahrzeuge beschafft, als in der betrachteten Stufe in den Einsatz überführt werden können. Der Zeitpunkt ist durch ein Warnsymbol hervorgehoben. Bis zu diesem Zeitpunkt muss die anschließende Optimierungsstufe abgeschlossen sein. Die Anzahl der Schnellladestationen im Diagrammtitel ist mit LP für Ladepunkte abgekürzt. Die Angabe bezieht sich jeweils auf die zusätzlichen Schnellladepunkte gegenüber der Basisvariante in LIS-Stufe 0 mit einer Schnellladestation an der Holländischen Straße.

1.7.3 Umsetzung Stufe 1 (+3 Schnelllader ggü. Stufe 0)

Einleitend wird Stufe 0 als gesetzt angenommen. Um herzuleiten, wann Stufe 1 nutzbar zur Verfügung stehen muss, wird das Einsatzpotenzial aus LIS-Stufe 0 den geplanten Beschaffungszahlen pro Fahrzeugtyp gegenübergestellt.

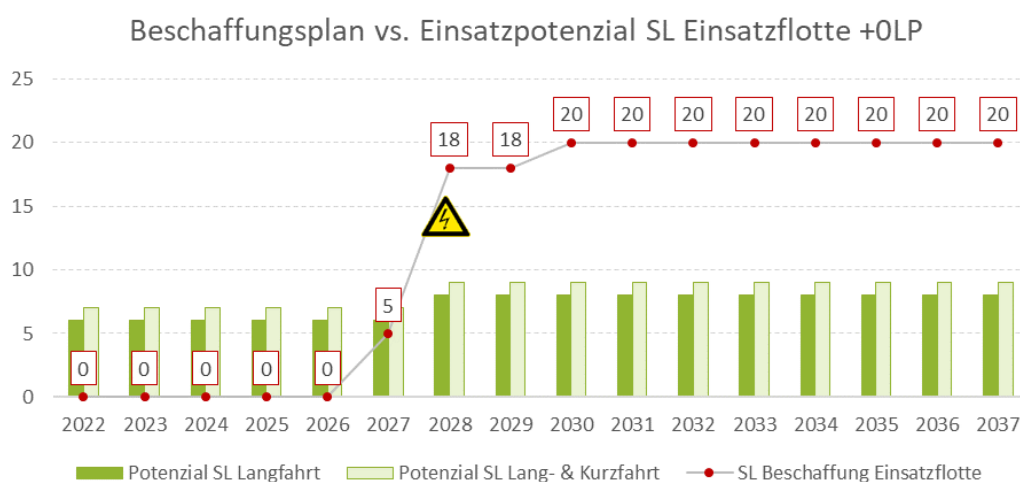


Abb. 28: Beschaffungsplan vs. Einsatzpotenzial Solobus in LIS-Stufe 0

Das erste Beschaffungsintervall nach Abschluss des MEKS-Projektes fällt für Solobusse auf das Jahr 2027. Die geplanten fünf Busse können in LIS-Stufe 0 betrieben werden. Ab dem Jahr 2028 muss jedoch bereits eine Einsatzflotte von 18 Fahrzeugen auf die Straße gebracht werden. Das Einsatzpotenzial reicht hierfür nicht aus, selbst wenn Lang- und Kurzfahrten für einen

⁸ Dies gilt unter der Einschränkung, dass ein entsprechendes Einsatzpotenzial zur Verfügung steht, was Gegenstand dieser Untersuchung ist.

Fahrzeugeinsatz in Betracht gezogen werden. Der Zeitpunkt ist über das gelbe Warnsymbol verdeutlicht.

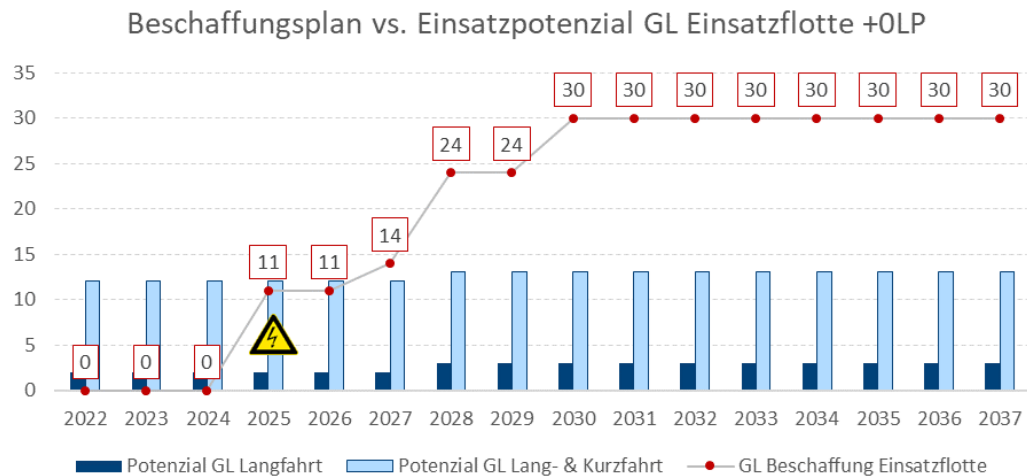


Abb. 29: Beschaffungsplan vs. Einsatzpotenzial Gelenkbus in LIS-Stufe 0

Bei Betrachtung der Gelenkbusse liegt der Zeitpunkt, ab dem LIS-Stufe 0 nicht für eine Integration der beschafften Einsatzflotte ausreicht, bereits im Jahr 2025. Daraus kann abgeleitet werden, dass LIS-Stufe 1 im Jahr 2025 nutzbar zur Verfügung stehen muss. Da hier der Fokus auf Langfahrten liegt, kann der Einführungszeitpunkt weiter nach hinten verschoben werden, wenn Gelenkbusse primär auf Kurzfahrten eingesetzt werden. In diesem Fall muss LIS-Stufe 1 spätestens ab dem Jahr 2027 zur Verfügung stehen. Hier wird angenommen, dass der Einsatz auf Langfahrten zu verfolgen ist. Entsprechend wird **LIS-Stufe 1 ab dem Jahr 2025** als notwendig angesetzt.

1.7.4 Umsetzung Stufe 2 (+5 Schnelllader ggü. Stufe 0)

Analog zur vorherigen Stufe wird auch hier das Einsatzpotenzial in LIS-Stufe 1 (+3 Schnelllader gegenüber Stufe 0) mit der geplanten Beschaffung der Einsatzflotte gegenübergestellt.

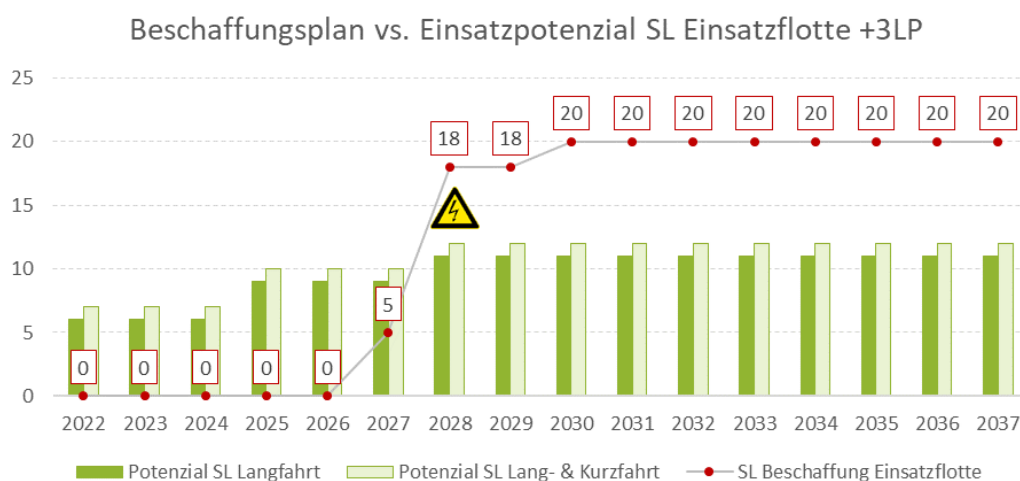


Abb. 30: Beschaffungsplan vs. Einsatzpotenzial Solobus in LIS-Stufe 1

Ab dem Jahr 2028 ist das Einsatzpotenzial der Solobusse nicht ausreichend, um die beschafften Fahrzeuge in Einsatz zu bringen. In diesem Jahr muss LIS-Stufe 2 für Solobusse zur Verfügung stehen.

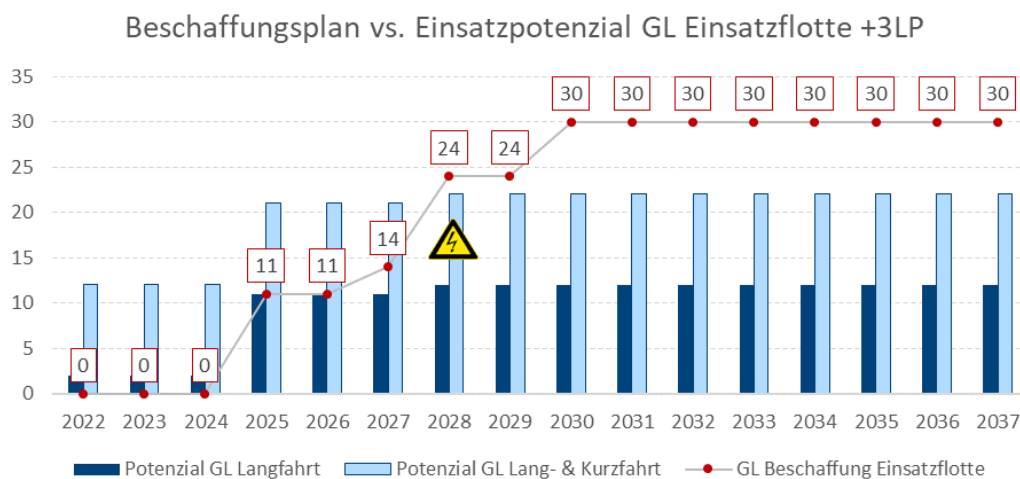


Abb. 31: Beschaffungsplan vs. Einsatzpotenzial Gelenkbus in LIS-Stufe 1

Auch das Einsatzpotenzial der Gelenkbusse ist im Jahr 2028 bereits voll ausgeschöpft, so dass in diesem Jahr auch für Gelenkbusse die nächste LIS-Stufe erforderlich ist. Sofern der Einsatz auf Langfahrten ein hartes Kriterium ist, muss der Zeitpunkt sogar nach vorne verschoben werden. Aufgrund des großen Anteils an Kurzfahrten im Feld der Gelenkbusse muss jedoch auf absehbare Zeit zumindest ein Teil der Fahrzeuge auf Kurzfahrten eingesetzt werden, weshalb der Betrieb auf

drei Kurzfahrten im Jahr 2027 hier als akzeptabel angenommen wird. **LIS-Stufe 2 wird ab dem Jahr 2028** als notwendig angesetzt.

1.7.5 Umsetzung der abschließenden Umlaufanpassung

Bereits in den bisherigen Ergebnissen wurde deutlich, dass eine Umlaufanpassung nicht vermeidbar ist. Der Zeitpunkt, ab dem die Anpassung erforderlich ist, wird analog zu den LIS-Ausbaupunkten bestimmt. Hierfür wird in LIS-Stufe 2 ebenfalls das Einsatzpotenzial mit dem Beschaffungsplan verglichen.

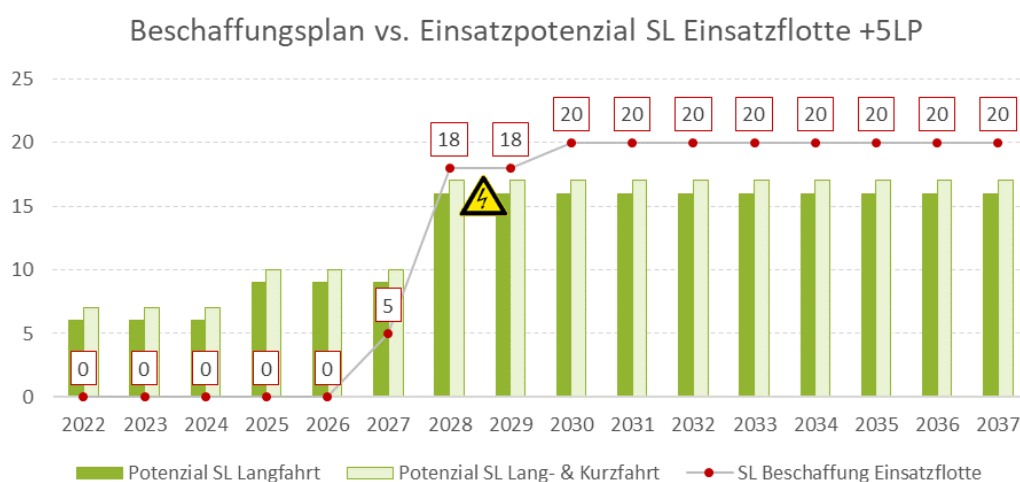


Abb. 32: Beschaffungsplan vs. Einsatzpotenzial Solobus in LIS-Stufe 2

Ab dem Jahr 2028 rangiert die beschaffte Einsatzflotte knapp über dem Einsatzpotenzial. Grundsätzlich kann bis zum Jahr 2030 unterstellt werden, dass drei Fahrzeuge der Reserve zuzuordnen sind. Da die Umlaufanpassung als letzte Optimierungsmaßnahme jedoch nur eine betriebliche Anpassung ohne zusätzliche Investitionen darstellt, wird diese hier auf das Jahr 2028 datiert.

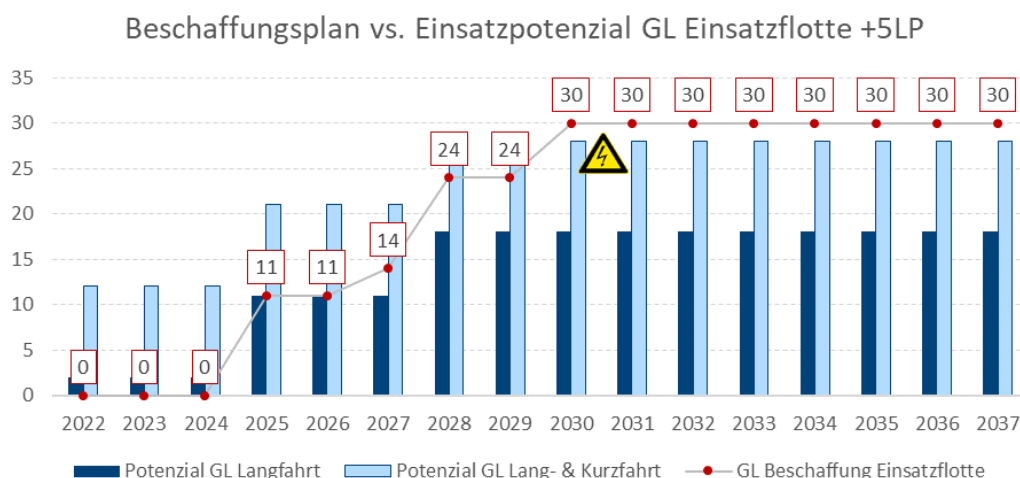


Abb. 33: Beschaffungsplan vs. Einsatzpotenzial Gelenkbus in LIS-Stufe 2

Für Gelenkbusse reicht das Einsatzpotenzial bis zum Jahr 2030. Aufgrund der Solobusse wird der Zeitpunkt für die Realisierung der abschließenden **Umlaufanpassung auf 2028 datiert**.

1.7.6 Umlaufanpassung

Die Umlaufanpassung stellt die letzte Optimierungsmaßnahme dar. Das bis zu diesem Zeitpunkt bereits ein Großteil aller Einsätze durch den Einsatz von Schnellladestationen machbar gestaltet ist, muss nur ein geringer Umlaufanteil angepasst werden. Für die Umlaufanpassung wird hier ein Springerbusprinzip unterstellt. Dabei wird ein reichweitenkritischer Umlauf von einem Fahrzeug aus dem Depot abgelöst. Bevorzugt wird hierfür ein Fahrzeug der Einsatzflotte gewählt, dass eine ausreichende Standzeit im Depot aufweist, um keinen Fahrzeugmehrbedarf auszulösen. Das „ungenutzte“ Fahrzeug wird vollgeladen an eine geeignete Wendestelle verbracht. Das Fahrzeug des reichweitenkritischen Umlaufs wird vom Transferfahrer übernommen und ins Depot zur Nachladung gefahren. Nach Vollladung (oder ggf. Teilladung) wird der abgelöste Bus für den geplanten Folgeeinsatz des ablösenden Busses eingesetzt oder steht zur Verfügung, um einen weiteren Umlauf abzulösen.

1.7.6.1 Umlaufanpassung Solobus

Im Feld der Solobusse verbleiben drei kritische Fahrzeugeinsätze in LIS-Stufe 2, die durch Umlaufanpassung optimiert werden müssen. In diesen Fällen sind die Einzelumläufe identisch zu den Fahrzeugtagesumläufen. Angepasst werden müssen die Umläufe 1301, 1302 und 1303. Umlauf 8035 ist ein sehr kurzer Umlauf, dessen Bus bereits frühzeitig als Springerbus zur Verfügung steht. Die relevanten Ansatzpunkte (Trennstellen) für die Umlaufanpassung sind in der folgenden Grafik dargestellt.

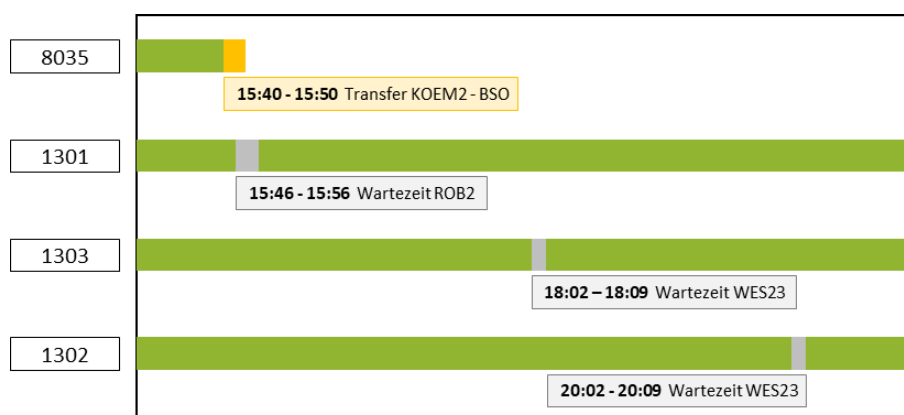


Abb. 34: Relevante Solobusumläufe vor Umlaufanpassung

Die Umläufe werden an den Trennstellen gekappt und neu zugeordnet, so dass sich ausreichende Intervalle ergeben, an denen das zugeordnete Fahrzeug im Depot nachgeladen werden kann. Durch den Einsatz von Transferfahrern wird das Fahrzeug im laufenden Betrieb gewechselt. Für den Fahrer des Linienumlaufs bleibt die Dienststruktur, mit Ausnahme des Umsteigens in ein Ersatzfahrzeug, unverändert. Die einzelnen Fahrzeuge werden nun nach abweichenden Mustern bewegt, so dass die folgende Umlaufneukonstellation zum Einsatz kommt.

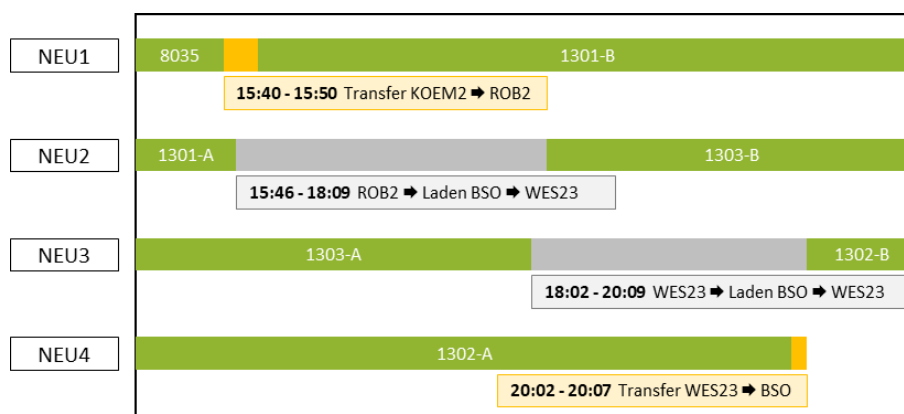


Abb. 35: Relevante Solobusumläufe vor Umlaufanpassung

Der Grafik kann entnommen werden, dass alle Umlaufteile vor Anpassung wieder aufgegriffen werden und in der neuen Konstellation erfüllt werden. Darüber hinaus bleibt auch bei vier Bussen die Fahrzeugzahl konstant, da das Fahrzeug von Umlauf 8035 als Springerbus eingesetzt wurde.

Nach demselben Muster werden auch die Gelenkbusumläufe angepasst, wobei hier lediglich zwei kritische Einsätze zur Debatte stehen. Angepasst werden müssen hier die Umläufe 1006 und 1007. Umlauf 1434 ist ein kurzer Umlauf, dessen zugeordneter Bus als Springerbus eingesetzt werden kann.

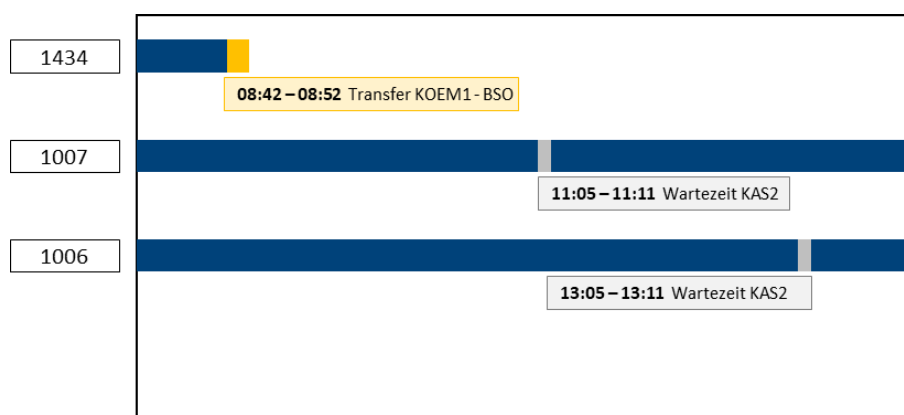


Abb. 36: Relevante Gelenkbuserläufe vor Umlaufanpassung

Auch hier sind die Trennstellen bereits in obenstehender Grafik dargestellt. Nach Trennung und Neuordnung ergibt sich die folgende Umlaufkonstellation.

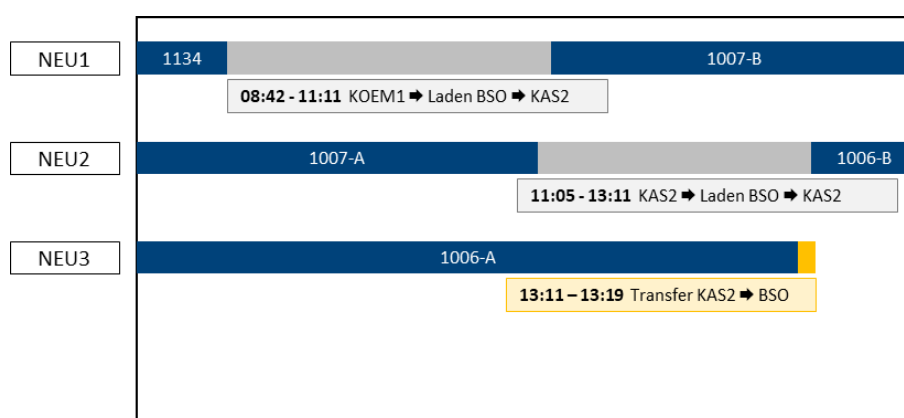


Abb. 37: Relevante Gelenkbuserläufe nach Umlaufanpassung

Auch hier werden alle Umlaufteile aufgegriffen und neu zugeordnet, um ausreichende Ladeintervalle im Depot zu ermöglichen. Bei drei Bussen bleibt die Fahrzeugzahl unverändert.

Sowohl die Umlaufanpassung für Solo- als auch für Gelenkbusse kann problemlos ohne einen erforderlichen Fahrzeugmehrbedarf realisiert werden.

Ergänzend zum dargestellten Vorschlag gibt es eine Vielzahl weiterer Optionen für die Umlaufanpassung, da im Vergleich zu den anzupassenden Umlaufzahlen (3 x SL und 2 x GL) großzügige Mengen zeitweise ungenutzter Fahrzeuge für eine Umlaufanpassung zur Verfügung stehen. Möglich sind auch sehr einfache Konzeptansätze, bei denen nicht alle Umläufe im Verbund angepasst werden. Es ist beispielsweise möglich alle kritischen Umläufe durch ein ungenutztes Fahrzeug einzeln abzulösen. Dabei übernimmt das abgelöste Fahrzeug immer den geplanten Folgeumlauf des ablösenden Fahrzeugs, anstatt einen weiteren Umlauf abzulösen, wie oben verfolgt.

1.8 AP 1.8 Ermittlung einer möglichen Lade- und Tankinfrastruktur

Die Ermittlung einer möglichen Ladeinfrastruktur wird hier in die Anwendungsbereiche Schnellladeinfrastruktur an Wendestellen und Depotladeinfrastruktur aufgeteilt.

1.8.1 Schnellladeinfrastruktur an Wendestellen

Für Schnellladepunkte muss jeweils eine Pantographenschnittstelle vorgesehen werden, über die eine Ladeleistung von mindestens 300 kW zur Verfügung gestellt werden kann. Grundsätzlich ist es unerheblich, ob der Pantograph von oben nach unten (Montage an Ladestation) oder von unten nach oben ausgefahren wird (Montage auf Fahrzeugdach), solange das Konzept einheitlich verfolgt wird. Alle mit Pantographen ausgerüsteten Fahrzeuge sollten mit allen Schnellladestationen kompatibel sein, um eine flexible Fahrzeugdisposition zu gewährleisten. Es gilt also flottenweit eine der beiden Varianten konsequent einzusetzen. Im Rahmen des MEKS-Projektes wurde die Variante mit einem Pantographensystem „von unten nach oben“ bereits eingeführt. Im Sinne der Kompatibilität sollte dieser Ansatz auch darüber hinaus verfolgt werden.

Entscheidender ist hier die Frage, ob eine einfache Systemausführung ausreicht, oder ob duale Systeme eingesetzt werden müssen, die zwei Fahrzeuge gleichzeitig bei 300 kW laden können.

Hinweis

Der Aufbau von dualen Ladestationen mit zwei individuellen 300 kW Leistungselektroniken wird grundsätzlich als sinnvoll eingestuft, um Redundanzen und Rückfallebenen zu schaffen. Dafür muss nicht zwingend jede Instanz dual ausgeführt sein, sofern eine Erreichbarkeit im Notfall auch von anderen Linien gewährleistet werden kann. Eine mögliche Alternative ist die Installation einer Notfall-Schnellladestation, zum Beispiel auf dem Betriebshofgelände. Ziel eines entsprechenden Systems ist die Aufrechterhaltung zumindest eines Notfallfahrplans, wenn eine Ladestation ausfallen sollte oder zeitweise nicht angefahren werden kann.

Um diese Frage zu beantworten, wird zunächst erhoben, ob sich Aufenthaltsdauern verschiedener Umläufe an den Ladestationen überhaupt überschneiden. Dies ist nur der Fall an den Ladepunkten Holländische Straße und Fraunhoferinstitut. An allen weiteren Standorten ist maximal ein Fahrzeug vor Ort, um eine Zwischenladung auszuführen. Dementsprechend ist die einfache Ausführung hier ausreichend.

In der Holländischen Straße kommt es zu diversen Überlappungen von Ladevorgängen, wenn keine einschränkende Maßnahmen (im Sinne eines Ladeplans) erfolgen. Im folgenden Zeitverlauf der Ladeleistung ist dies erkennbar an den Peak-Werten, die bis auf 600 kW ansteigen.

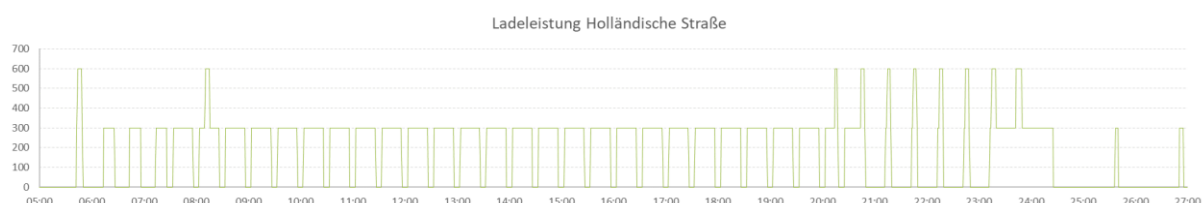


Abb. 38: Umgesetzt Ladeleistung im Zeitverlauf Holländische Straße (ohne Restriktionen)

Um zu prüfen, ob hier auch eine einfache Ausführung ohne zweite Ladeschnittstelle ausreichend ist, müssen alle Ladevorgänge mit Überlappung einzeln ins Auge gefasst werden. Dabei wird

verglichen, welche Auswirkungen sich ergeben, wenn einzelne Ladevorgänge gestrichen oder mit Verzögerung begonnen werden. Es kann hier festgehalten werden, dass Ladevorgänge nicht beliebig übersprungen werden können. Dennoch gibt es eine Herangehensweise, die umsetzbar ist. Die notwendigen Maßnahmen sind im Folgenden pro betroffenem Umlauf dargestellt.

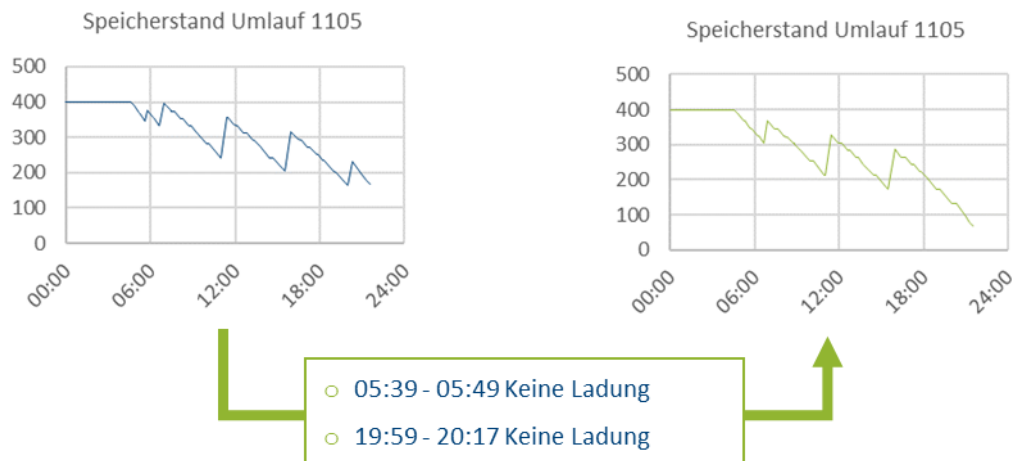


Abb. 39: Restriktive Eingriffe zur Vermeidung Doppelladung an Holländische Straße Umlauf 1105

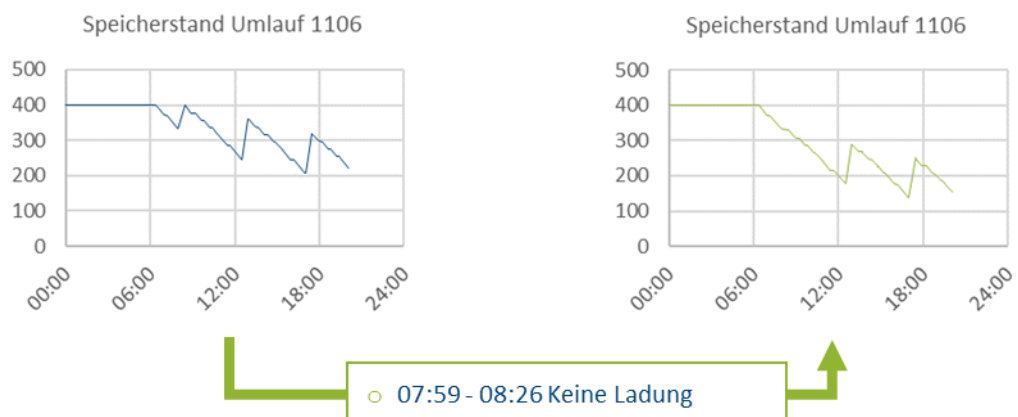


Abb. 40: Restriktive Eingriffe zur Vermeidung Doppelladung an Holländische Straße Umlauf 1106

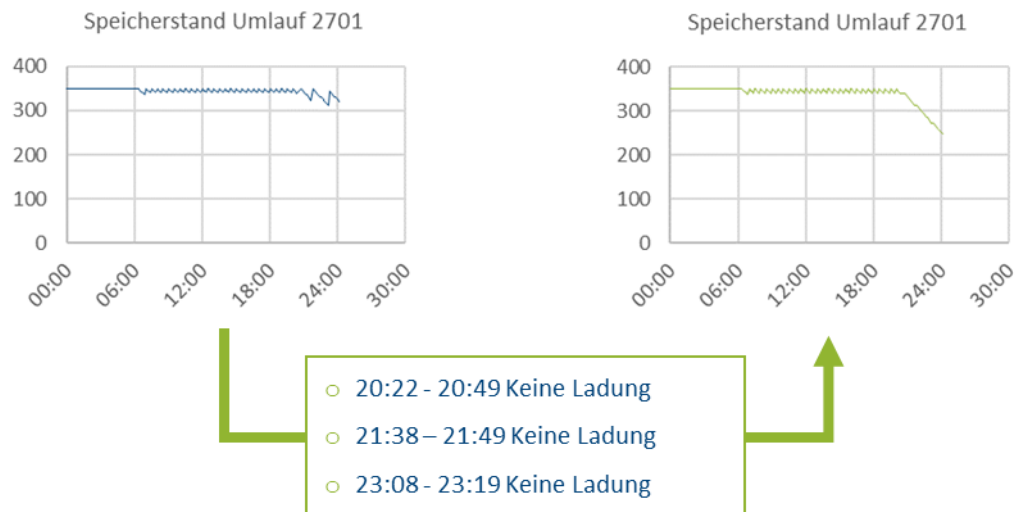


Abb. 41: Restriktive Eingriffe zur Vermeidung Doppelladung an Holländische Straße Umlauf 2701

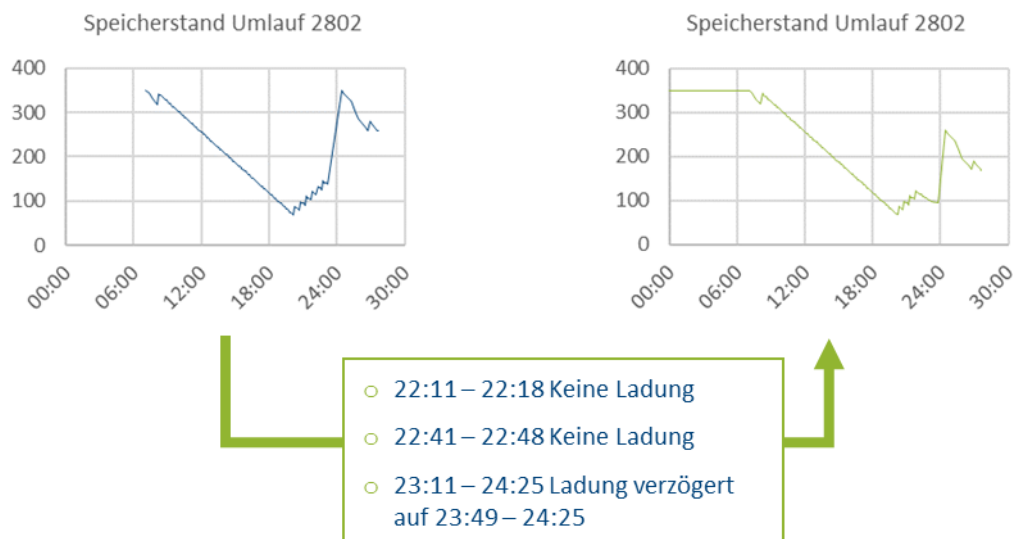


Abb. 42: Restriktive Eingriffe zur Vermeidung Doppelladung an Holländische Straße Umlauf 2802

1.8.2 Depotladeinfrastruktur

1.8.2.1 Lastgangoptimierung

Für die Auslegung der Depotladeinfrastruktur wird zunächst der zu erwartende Lastgang einer Optimierung unterzogen. Damit wird das Systemverhalten eines grundlegenden Lademanagementsystems nachgebildet. Ziel der Lastgangoptimierung ist die Reduktion der maximal aus dem Netz bezogenen Leistung. Einerseits hat dies tarifliche Gründe, da die geltend gemachten Energiekosten typischerweise abhängig vom Spitzenwert in den Stromtarifen definiert werden. Andererseits betrifft dies auch die Systemauslegung selbst und die Anforderungen an den Netzanschluss. Bei kleinerer maximaler Netzlast können auch Komponenten des Ladesystems, wie MS/NS Transformator, Schaltanlagen und ähnliches kleiner dimensioniert werden. Gleiches gilt auch für den Netzanschluss, der kleiner ausfallen kann, wenn kleinere Peak-Werte realisiert werden.

Es wird jedoch empfohlen, den Netzanschluss möglichst großzügig zu dimensionieren, wenn hier ein Ausbau erforderlich ist. Grund ist der Vorhalt eines Ausbaupotenzials, wenn Ladeleistungen zukünftig anwachsen, Flotten vergrößert werden oder andere Fahrzeuge in das Ladekonzept eingebunden werden.

Für die Lastgangoptimierung wird eine fiktive Betriebstagesfolge angesetzt, um ein maximales Anforderungsprofil für das Ladesystem vorzugeben. Hierbei wird angenommen, dass nach Freitag_Schule erneut derselbe Betriebstag Freitag_Schule absolviert wird. Damit wird die maximale Fahrleistung und folglich der maximale Energie- beziehungsweise hier Nachladebedarf als Vorgabe definiert. Gleichzeitig werden frühe Abfahrtszeiten eines Wochentages angesetzt, weshalb die Ladungen früh beendet sein müssen. Da im Samstagsfahrplan weniger Fahrzeuge eingesetzt werden, würde sich ansonsten ein großzügigeres Zeitfenster für die Aufenthaltsdauer der Fahrzeuge im Depot ergeben.

Hinweis

In den Grafiken zur Lastganganalyse sind alle Fahrzeuge aufgeführt, die eine Ladeanforderung an das Ladesystem stellen. Also alle Fahrzeuge, die über den Betriebstag im Einsatz waren (Einsatzflotte Freitag_Schule). Darüber hinaus stehen im Betriebshof Reservebusse, die zwar einen Stell- und Ladeplatz erfordern, jedoch keine zusätzliche Anforderung an das Ladesystem stellen. Da diese Fahrzeuge ersatzweise für Fahrzeuge der Einsatzflotte eingesetzt werden, hat der Fahrzeugwechsel keinen Einfluss auf den Lastgang.

Die Ladeleistung wird mit 130 kW pro Bus angenommen. Der Wirkungsgrad wird pauschal mit 90 % ab Netzanschluss bis Fahrzeug definiert. Pro Ladevorgang resultiert also eine Netzlast von ca. 144 kVA.

Hier werden zwei Szenarien unterschieden, um die Auslegung zukunftsfähig zu gestalten. Einleitend wird eine Lastgangoptimierung für die ausgewählte Vorzugstechnologie ausgeführt. Dies entspricht dem Ladebedarf für BEV mit Schnellladung an allen sechs Schnellladestationen (inklusive Holländische Straße). Ergänzend wird ein Modell verfolgt, das als Zukunftsszenario interpretierbar ist. Hierbei erfolgt die Nachladung ausschließlich im Depot, ohne auf Schnellladestationen zurückzugreifen. Im Modell wird eine unendliche Batterie unterstellt. Damit wird jeder berechnete Energiebedarf bei einer Eins-zu-Eins-Umstellung der aktuellen Diesel-Umlaufkonstellation aus der Traktionsbatterie gedeckt und muss nach Abschluss des Umlaufs im

Depot nachgeladen werden. Auch wenn die tatsächliche Entwicklung des Ladebedarfs unbekannt ist, kann dieses Modell als grober Indikator für einen zukünftigen Ladebedarf herangezogen werden (Horizont 2040).

Lastgangoptimierung für gewählte Vorzugstechnologie

Das Szenario entspricht LIS-Stufe 2 nach absolvierter Umlaufanpassung.

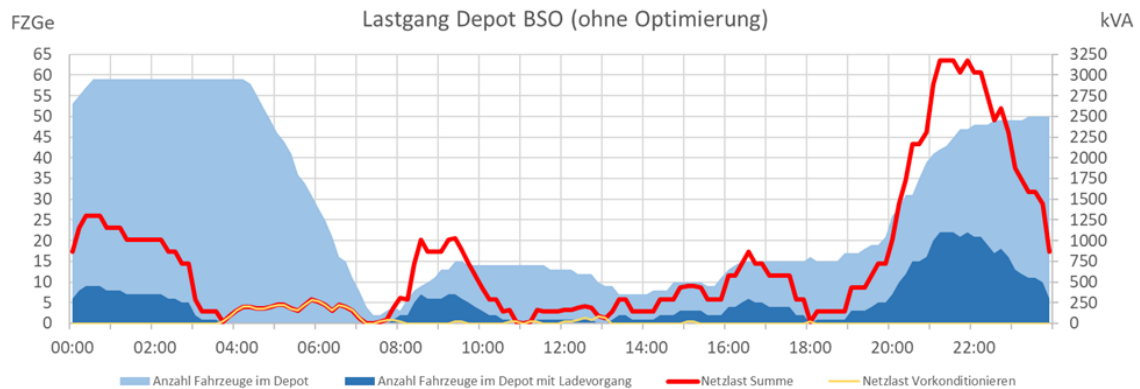


Abb. 43: Lastgang Depot BSO für Vorzugstechnologie vor Optimierung

Vor Lastgangoptimierung ist ein deutlicher Peak bis auf 3.178 kVA in den späten Abendstunden erkennbar. Nach Umlaufoptimierung kann der Lastgang deutlich verbessert werden.

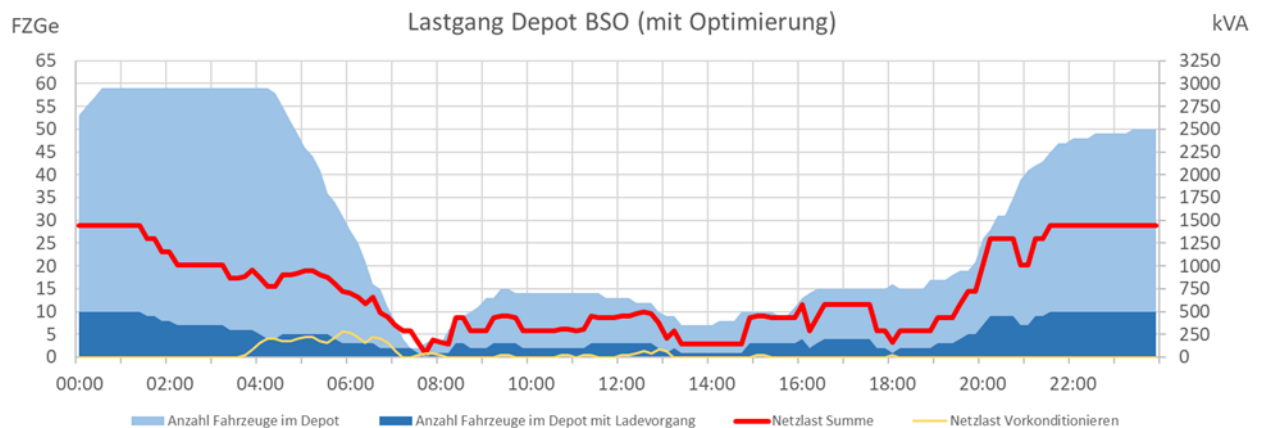


Abb. 44: Lastgang Depot BSO für Vorzugstechnologie nach Optimierung

Die Lastspitze kann durch Lastgangoptimierung um ca. – 55 % auf 1.444 kVA reduziert werden. Nach Optimierung laden maximal 10 Fahrzeuge gleichzeitig. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich um eine Idealsituation handelt. Um Reserven für Abweichungen im Betriebsablauf und Sondersituationen vorzuhalten, sollte in jedem Fall eine Leistungsreserve vorgehalten werden.

Lastgangoptimierung für Zukunftsszenario

Im hypothetischen Zukunftsszenario mit unendlicher Batterie und ohne jegliches Zwischenladen auf Linie ergibt sich vor Optimierung ein deutlich höherer Peak-Wert als im vorangegangenen Fall. Besonderheit des Szenarios ist eine leicht erhöhte Ladeleistung, da andernfalls die

Aufenthaltsdauern zu kurz sind, um die Fahrzeugbatterien wieder vollzuladen. Statt 130 kW wird hier eine Ladeleistung von 150 kW angesetzt.

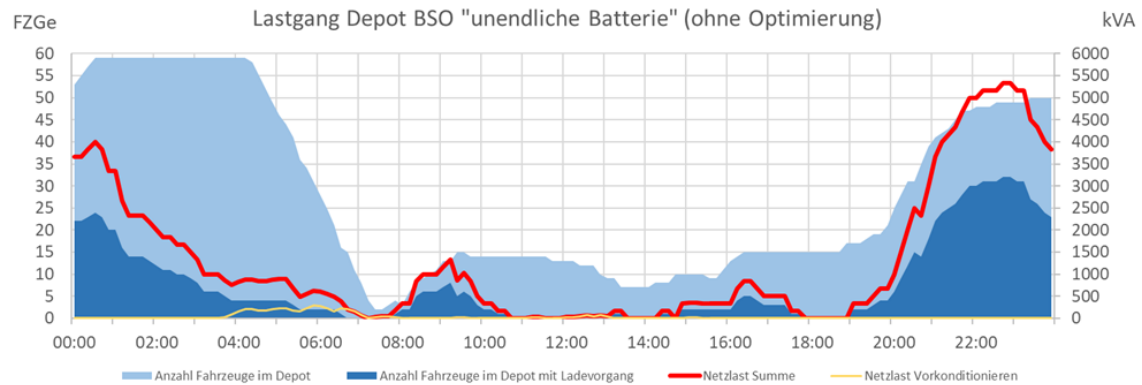


Abb. 45: Lastgang Depot BSO für Zukunftsszenario vor Optimierung

Auch hier liegt die Lastspitze vor Optimierung in den späten Abendstunden, da hier ein Großteil der Fahrzeuge in den Betriebshof einläuft. Mit 5.333 kVA ist die Amplitude deutlich höher als zuvor. Durch Lastgangoptimierung kann der Spitzenwert um ca. – 41 % auf 3.167 kVA reduziert werden.

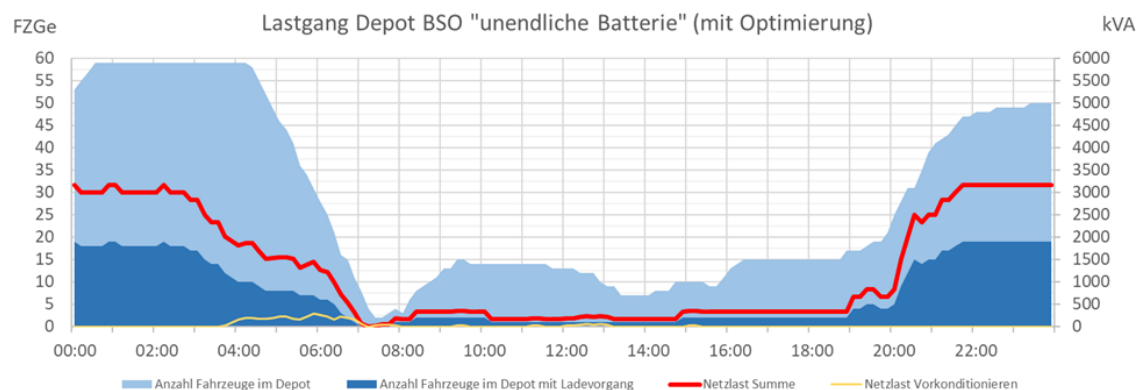


Abb. 46: Lastgang Depot BSO für Zukunftsszenario nach Optimierung

1.8.2.2 Konzeptionierung Depotladeinfrastruktur

Die KVG befindet sich aktuell in Planungsmaßnahmen zur Neugestaltung des Betriebshofs BSO. Entsprechend sollte das Thema Ladeinfrastruktur hier nur begleitend und in Grundzügen aufgenommen werden. Da die genaue Planungsgrundlage unbekannt ist beziehungsweise im Planungsprozess möglichen Änderungen unterworfen ist, erfolgt die Konzeptionierung hier auf theoretischer Ebene. Die Ausführung des Betriebshofs kann dabei einen Einfluss auf die Systemkonzeptionierung haben.

Unterstellt wird hier der Einsatz von Matrix-Ladesystemen nach Stand der Technik. Philosophie des Matrixansatzes ist es, eine vergleichsweise kleine Ladeinfrastruktur an möglichst viele Ladepunkte anzubinden. Die Leistungseinheit ist in Module strukturiert, die flexibel auf die angebundenen Ladepunkte verschaltet werden kann. Übliche Modulgrößen liegen zwischen 20 und 50 kW. Ein 400 kW Ladesystem kann also beispielsweise aus 16 individuellen 25 kW Modulen bestehen.

Selbstverständlich muss planerisch sichergestellt sein, dass die installierte Ladeleistung ausreicht, um alle angebundenen Fahrzeuge rechtzeitig vollzuladen. Um dies sicherzustellen ist es möglich, dass die Ladeplätze jedes einzelnen Busses vorgegeben werden.

Auf Basis der Lastganganalysen oben können wesentliche Eckdaten für ein Matrix-Ladesystem hergeleitet werden.

- Eckdaten für Lastgang nach gewählter Vorzugstechnologie
 - o Maximal 10 gleichzeitig ladende Fahrzeuge
 - o Maximale Ladeleistung pro Fahrzeug 130 kW
 - o Fahrzeuganzahl 80 Busse
- Eckdaten für Lastgang im Zukunftsszenario
 - o Maximal 19 gleichzeitig ladende Fahrzeuge
 - o Maximale Ladeleistung pro Fahrzeug 150 kW
 - o Fahrzeuganzahl 80 Busse

Anhand der Eckdaten kann ein ideales Ladesystem unter idealen Bedingungen hergeleitet werden. Nach Vorzugstechnologie laden maximal 10 Fahrzeuge gleichzeitig mit jeweils 130 kW. Zur Erfüllung reichen theoretisch 10 x 130 kW Ladesysteme. Auf diese 10 Einheiten werden alle 80 Ladepunkte verteilt. Also 8 Ladepunkte pro Systemeinheit. Sofern die Fahrzeuge dem Ladeplan entsprechend auf die einzelnen Systeminstanzen verteilt werden, ist ein derartiges System funktionabel, sofern es zu keinen Abweichungen kommt. Für das Zukunftsszenario lässt sich analog ein System mit 19 x 150 kW Ladesystemen herleiten, an die jeweils 4 bis 5 Ladepunkte angebunden sind.

In der Praxis sollte das Ladesystem deutliche Reserven aufweisen, um Flexibilitäten offen zu halten. Darüber hinaus sollte eine Aufteilung pro Fahrzeugtyp verfolgt werden, um die Ladesysteme jeweils an Gruppen benachbarter Ladeplätze anzubinden. Da Gelenk- und Solobusse andere Parkplatzgrößen erfordern, sollte diese Trennung der Systeme bereits im Auslegungsprozess berücksichtigt werden. Eine Aufteilung in „lokale Gruppen“ mit jeweils einer Instanz des Ladesystems ist streng genommen nicht erforderlich, da die Zuordnung nur über Kabelstrecken erfolgt. Mit Hinblick auf Wartungs- und Reparaturmaßnahmen bietet sich eine derartige Zuordnung jedoch an, um ein gut nachvollziehbares System zu etablieren.

Ohne Kenntnis der örtlichen Begebenheiten schlagen wir Instanzen des Ladesystems vor, die jeweils an 4 oder 8 Ladepunkte angebunden sind. Dies entspricht auch den marktüblichen Systemvarianten. Die Systemleistung einer Systeminstanz sollte bei mindestens 200 kW (Variante mit 4 LP) beziehungsweise 400 kW (für 8 LP) liegen. Üblicherweise sind Systeme in 50 bis 100 kW schrittweise dimensionierbar, so dass diese Werte gut zu realisieren sind. Die größere Variante mit 8 Ladepunkten ist gegenüber der kleinen Ausführung im Vorteil, da die Modulleistungen innerhalb des Subsystems flexibler auf 8 Ladepunkte verteilt werden können. Im kleinen Systemansatz kann die Systemleistung nur zwischen 4 Ladepunkten variabel aufgeteilt werden. Beide Systemvarianten erfüllen die Anforderungen sowohl für die Auslegung nach der Vorzugstechnologie als auch nach dem Zukunftsszenario.

Im Durchschnitt ergibt sich eine mittlere zu installierende Ladeleistung pro Bus von ca. 50 kW. Dieser Wert entspricht einem marktüblichen Standardwert im Feld der Matrixladesysteme und wird als ausreichend eingeschätzt.

Perspektivisch sollte eine zusätzliche Reserve für die langfristige Nutzung vorgehalten werden. Dies betrifft hier insbesondere die Möglichkeit, dass ein Zwischenladungskonzept langfristig nicht weiterverfolgt wird. Dies entspricht dem Zukunftsszenario mit ausschließlicher Depotladung. Nach aktueller Umlaufgestaltung scheint der Entwurf auch hierfür geeignet. Da heute jedoch nicht absehbar ist, wie die Umlaufstruktur in 10 oder 20 Jahren aussieht, empfehlen wir ein erweiterungsfähiges System. Es sollte möglich sein, den einzelnen Instanzen des Ladesystems zusätzliche Lademodule hinzuzufügen, ohne den weiteren Aufbau der Infrastruktur zu beeinflussen.

Wir empfehlen, die Möglichkeit zur Steigerung der Ladeleistung einer jeden Instanz von 400 auf 600 kW offenzuhalten. Bei der Bauplanung des Technikbereichs im neuen Betriebshof sollten entsprechende Platzreserven vorgesehen werden, um einen zusätzlichen Schaltschrank an das System anzubinden. Beziehungsweise sollte das Gehäuse zunächst teilbestückt mit 400 kW installiert werden. Zusätzliche Moduleinschübe für eine Steigerung auf 600 kW würden in diesem Fall frei gelassen.

Anmerkung

Sofern die entsprechenden Gestaltungsmöglichkeiten bestehen, empfehlen wir im Rahmen der Betriebshofneuplanung möglichst viele Ausbaureserven vorzusehen. Dies betrifft insbesondere den Netzanschluss und die Abstellflächen. Auch wenn aktuell der Einsatz von Pantographen verfolgt wird, kann langfristig der Einsatz von Megawatt-Charging-Systemen per Steckkontakt eine gangbare Alternative darstellen. Ähnlich heutiger CCS-Ladestecker erfolgt die Zuführung von der Fahrzeugseite, was entsprechende Platzreserven in der Abstellung einfordert. Darüber hinaus ist ein vorausschauender Ausbau auch auf alle anderen Bereiche übertragbar. Technikräume für Ladeelektroniken sollten über freie Stellflächen verfügen, Kabeltrassen nachrüstbar sein und Leerrohre an baulich anspruchsvollen Stellen vorbereitet werden.

1.9 AP 1.9 Analyse zur möglichen Energiebereitstellung, Konfiguration von Ladestationen sowie Möglichkeiten zur Betankung mit Wasserstoff

Wesentliche Teile dieses Arbeitspakets sind bereits im vorherigen Kapitel 1.8 AP 1.8 *Ermittlung einer möglichen Lade- und Tankinfrastruktur* aufgeführt. Die Überschrift dieses Kapitels entspricht der Bezeichnung des Arbeitspakets vor Ausführung der Untersuchungen. Aufgrund der zuvor getroffenen Auswahl von BEV als Vorzugstechnologie bezieht sich das Kapitel hier ausschließlich auf elektrische Ladeinfrastruktur.

Netzanschluss

Die Netzanbindung sollte nach Möglichkeit für das Zukunftsszenario geeignet sein und entsprechende Reserven aufweisen. Eine Dimensionierung von 4 MVA wird als sinnvoll erachtet. Kurz- und mittelfristig reicht eine Auslegung auf die Vorzugstechnologie aus. Um ausreichende Reserven sicherzustellen, sollte hier jedoch ein Netzanschluss von mindestens 2 MVA gegeben sein.

Einsatz stationärer Speicher

Der Einsatz stationärer Speicher ist insbesondere dann sinnvoll, wenn ausgeprägte Lastspitzen vorliegen, die durch ein Lademanagementsystem nicht kompensiert werden können. Dies ist insbesondere der Fall, wenn Umläufe im großen Umfang angepasst werden müssen und am Tag viele Ladevorgänge anfallen, die über die gesamte Anwesenheitsdauer des Fahrzeugs anhalten. In diesen Fällen können Ladevorgänge nicht, oder nur eingeschränkt, verschoben werden. Im Zukunftsszenario erfolgt keine Umlaufanpassung. Entsprechend sind keine Lastspitzen am Tag zu verzeichnen. Ähnliches gilt im Auslegungsszenario nach Vorzugstechnologie. Aufgrund der Schnellladung im Liniennetz erfolgt nur eine minimale Umlaufanpassung. Auch hier sind am Tag keine nennenswerten Lastspitzen zu verzeichnen.

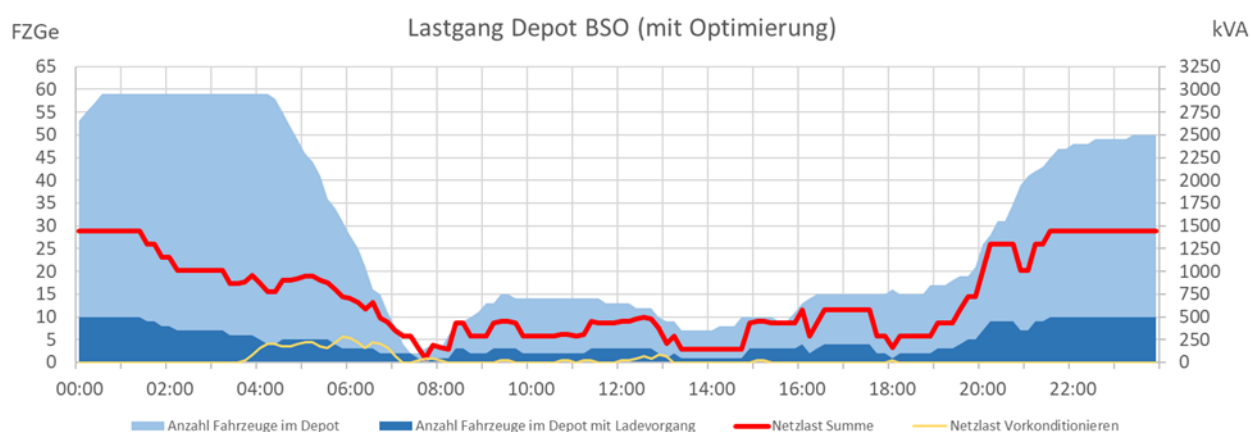


Abb. 47: Lastgang Depot BSO für Vorzugstechnologie nach Optimierung

Der Einsatz eines stationären Speichers hätte erst eine Auswirkung, wenn die nächtliche Spitze dadurch reduziert werden kann. Dafür sind Speichergrößen erforderlich, die heute nicht wirtschaftlich darstellbar sind. Dies gilt insbesondere, da die resultierende Lastspitze mit 1.444 kVA im Kontrast zur Flottengröße nicht sonderlich groß ausfällt.

Energiemengen pro Jahr

Um die jährlich zu erwartenden Energiemengen für die gewählte Vorzugstechnologie zu berechnen, werden die Umlaufdaten für alle Betriebstage ausgewertet. Als Berechnungsgrundlage wird ein ganzjähriger Mittelwert für den Fahrzeugverbrauch angesetzt (Average-Case).

		Depot BSO			Depot FVUI		
		Solobus	Gelenkbus	Midibus	Solobus	Gelenkbus	Midibus
Schule	Mo-Do	7.253 kWh	16.652 kWh	0 kWh	1.240 kWh	123 kWh	590 kWh
	Freitag	7.442 kWh	16.652 kWh	0 kWh	1.240 kWh	123 kWh	590 kWh
	Samstag	7.230 kWh	8.749 kWh	0 kWh	607 kWh	0 kWh	213 kWh
	Sonntag	3.993 kWh	5.836 kWh	0 kWh	1.073 kWh	0 kWh	163 kWh
	Schulwoche	47,68 MWh	97,85 MWh	0,00 MWh	7,88 MWh	0,61 MWh	3,33 MWh
Ferien	Mo-Do	6.283 kWh	15.963 kWh	0 kWh	1.135 kWh	19 kWh	595 kWh
	Freitag	7.362 kWh	15.111 kWh	0 kWh	1.135 kWh	19 kWh	595 kWh
	Samstag	7.230 kWh	8.749 kWh	0 kWh	607 kWh	0 kWh	213 kWh
	Sonntag	3.993 kWh	5.836 kWh	0 kWh	1.073 kWh	0 kWh	163 kWh
	Ferienwoche	43,72 MWh	93,55 MWh	0,00 MWh	7,35 MWh	0,10 MWh	3,35 MWh

Abb. 48: Verbrauchsübersicht pro Betriebstag, Depot und Fahrzeugtyp - im Depot und an Schnellladestationen

In obenstehender Abbildung sind die Verbrauchswerte pro Betriebstag aufgetragen, die in Summe im Depot und an den Schnellladepunkten anfallen. Die Werte entsprechen dem Gesamtenergiebedarf zum Betrieb einer vollständig elektrifizierten Busflotte. Hochgerechnet auf ein Kalenderjahr ergeben sich folgende Energiemengen:

	Depot BSO		
	Solobus	Gelenkbus	Midibus
Jahresmenge pro Fahrzeugtyp	2.432 MWh	5.036 MWh	0 MWh
Jahresmenge pro Depot	7.468 MWh		

Tab. 5: Jahresenergieverbrauch Depot BSO – im Depot und an Schnellladestationen

	Depot FVUI		
	Solobus	Gelenkbus	Midibus
Jahresmenge pro Fahrzeugtyp	404 MWh	26 MWh	173 MWh
Jahresmenge pro Depot	603 MWh		

Tab. 6: Jahresenergieverbrauch Depot FVUI – im Depot und an Schnellladestationen

Für das Depot BSO kann der Datensatz weiter differenziert werden, indem die Menge an Schnellladestationen bezogener elektrischer Energie aus der Bilanz rausgerechnet wird. Folgend dargestellt sind die Verbrauchswerte pro Betriebstag, die ausschließlich im Depot nachgeladen werden. Für Depot FVUI ergibt sich keine Änderung, da die Energie nur im Depot zugeführt wird.

		Depot BSO		
		Solobus	Gelenkbus	Midibus
Schule	Mo-Do	5.076 kWh	7.497 kWh	0 kWh
	Freitag	5.035 kWh	7.497 kWh	0 kWh
	Samstag	3.860 kWh	4.326 kWh	0 kWh
	Sonntag	2.285 kWh	2.870 kWh	0 kWh
	Schulwoche	31,48 MWh	44,68 MWh	0,00 MWh
Ferien	Mo-Do	5.265 kWh	6.069 kWh	0 kWh
	Freitag	5.621 kWh	5.723 kWh	0 kWh
	Samstag	3.860 kWh	4.326 kWh	0 kWh
	Sonntag	2.285 kWh	2.870 kWh	0 kWh
	Ferienwoche	32,83 MWh	37,19 MWh	0,00 MWh

Abb. 49: Verbrauchsübersicht pro Betriebstag, Depot und Fahrzeugtyp – nur im Depot

In Summe ergibt sich die folgende Energiemenge, die über das Depot BSO bezogen wird:

Depot BSO			
	Solobus	Gelenkbus	Midibus
Jahresmenge pro Fahrzeugtyp	1.653 MWh	2.234 MWh	0 MWh
Jahresmenge pro Depot	3.887 MWh		

Tab. 7: Jahresenergieverbrauch Depot BSO – nur im Depot ohne Schnellladestationen

Energiebezugsquellen

Da hier ein rein elektrisches Konzept verfolgt wird, muss für eine vollständige bilanzielle Emissionsfreiheit ausschließlich klimaneutraler Strom bezogen werden. Dafür ist der Abschluss eines entsprechenden Tarifs ausreichend. Dies wird auch als Vorgabe in den meisten Förderprogrammen zur Elektromobilität angeführt.

1.10 AP 1.10 Erstellung eines Tank- und Lademanagementsystems für Fahrzeug und Ladepunkte

Für die Ausarbeitung eines finalen Ladeplans muss die Betriebshofstruktur sowie die finale Infrastrukturauslegung bekannt sein. Abhängig vom Aufbau der Stellflächen (z.B. bei Blockaufstellung Anzahl und Länge der Spuren) und dem Aufbau des Ladesystems können abweichende Ladepläne sinnvoll sein.

Da der Ladeplan hier nur auf theoretischer Basis erarbeitet werden kann, wird auch hier auf das Maximalszenario der Lastgangoptimierung („Freitag auf Freitag“) zurückgegriffen. An allen Wochentagen liegen damit gleiche oder kleinere Anforderungen an das Ladesystem vor.

Im Folgenden sind tabellarisch die Kerndaten des Ladeplans pro Instanz der Ladeinfrastruktur abgebildet. Jede Instanz kann mit bis zu 8 Ladepunkten ausgestattet werden und entspricht dem Konzeptvorschlag aus Kapitel 1.8.2.2 *Konzeptionierung Depotladeinfrastruktur* mit 400 kW Systemleistung pro Instanz. Die Begriffe Zwischenladung am Tag (ZL) und Übernachtladung (ÜNL) sind als Rubrik Ladungstyp in den Tabellen abgekürzt.

Ergänzend wird jede Systeminstanz grafisch dargestellt. Dabei ist die Aufenthaltsdauer in Gelb pro Fahrzeug über einer Zeitachse (X-Achse) dargestellt. Ladevorgänge sind über ein #-Symbol dargestellt. Die Vorkonditionierung erfolgt unmittelbar vor Abfahrt und ist in den Grafiken mit dem dazugehörigen Netzlastwert („22“) vermerkt.

Wie den Daten und Darstellungen zu entnehmen ist, können nahezu alle Ladevorgänge pro Instanz einfach hintereinander ausgeführt werden. Nur in Einzelfällen kommt es zu Konflikten mit der Anwesenheitsdauer, so dass zwei Ladevorgänge in einer Instanz zeitweise parallel erfolgen. Da jede Systeminstanz mit 400 kW Systemleistung ausgerüstet ist, können bis zu drei Ladevorgänge parallel erfolgen. Abhängig vom internen Aufbau (Modulgröße der Leistungsmodule) kann es sein, dass der Dritte Ladevorgang nicht mit voller Leistung erfolgen kann. Da maximal zwei Ladevorgänge pro Instanz über kurze Zeiträume parallel erfolgen, verbleibt eine ausreichende Leistungsreserve, selbst wenn der Dritte Ladevorgang „nur“ mit 100 kW erfolgen kann.

LIS-Instanz Nr. 1 (GL)

LIS-Instanz 1: 8 Ladungen (GL)								
Umlaufname		Uhrzeit		Ladung	Ladung		Vorkonditionierung	
AN	AB	AN	AB	Typ	Start	Ende	Start	Ende
8005 FR_S	1703 FR_S	07:47	09:40	ZL	07:57	08:12	09:20	09:40
1433 FR_S	8007 FR_S	08:37	15:25	ZL	12:40	13:13	15:00	15:20
2201 FR_S	1002 FR_S	08:44	28:21	ÜNL	08:54	09:53	27:50	28:20
8007 FR_S	1104 FR_S	16:07	29:14	ÜNL	18:50	19:05	28:40	29:10
1008 FR_S	1101 FR_S	20:03	29:49	ÜNL	20:13	21:15	29:10	29:40
1102 FR_S	1701 FR_S	20:24	30:10	ÜNL	21:20	22:44	29:40	30:10
1101 FR_S	1107 FR_S	20:52	30:27	ÜNL	22:50	24:42	29:50	30:20
1011 FR_S	1010 FR_S	21:41	30:51	ÜNL	24:50	25:28	30:20	30:50

Tab. 8: Übersicht Ladeparameter LIS-Instanz 1 (GL)

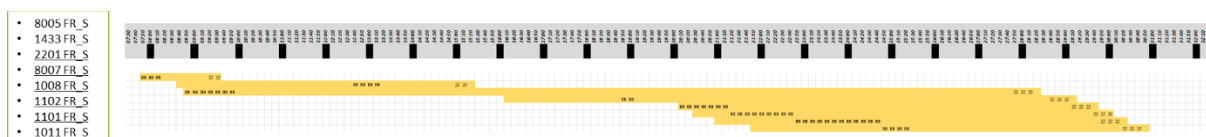


Abb. 50: Zeitverlauf Ladevorgänge LIS-Instanz 1 (GL)

LIS-Instanz Nr. 2 (GL)

LIS-Instanz 2: 8 Ladungen (GL)								
Umlaufname		Uhrzeit		Ladung	Ladung		Vorkonditionierung	
AN	AB	AN	AB	Typ	Start	Ende	Start	Ende
8037 FR_S	1710 FR_S	07:58	11:35	ZL	08:20	08:44	11:10	11:30
1031 FR_S	8008 FR_S	08:13	12:20	ZL	09:40	10:25	12:00	12:20
8008 FR_S	NEU3	13:05	28:34	ÜNL	13:15	13:31	28:00	28:30
1704 FR_S	2801 FR_S	18:57	29:19	ÜNL	19:10	20:15	28:40	29:10
1106 FR_S	1108 FR_S	20:04	29:58	ÜNL	20:20	21:42	29:20	29:50
1701 FR_S	2133 FR_S	20:27	30:14	ÜNL	21:50	22:54	29:40	30:10
NEU2	1433 FR_S	20:55	30:39	ÜNL	23:00	24:51	30:00	30:30
NEU1	8005 FR_S	24:07	31:01	ÜNL	25:00	27:51	30:30	31:00

Tab. 9: Übersicht Ladeparameter LIS-Instanz 2 (GL)

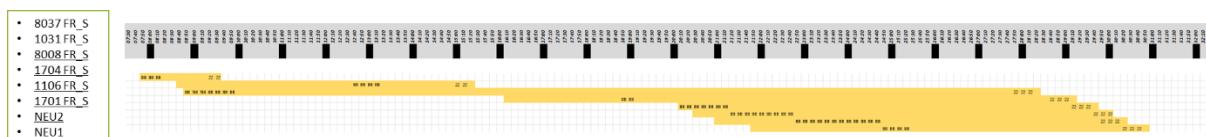


Abb. 51: Zeitverlauf Ladevorgänge LIS-Instanz 2 (GL)

LIS-Instanz Nr. 3 (GL)

LIS-Instanz 3: 8 Ladungen (GL)								
Umlaufname		Uhrzeit		Ladung	Ladung		Vorkonditionierung	
AN	AB	AN	AB	Typ	Start	Ende	Start	Ende
NEU1	NEU1	08:52	11:03	ZL	09:02	09:37	10:40	11:00
NEU2	NEU2	11:13	13:03	ZL	11:23	12:45	12:45	13:03
NEU3	1001 FR_S	13:13	28:39	ÜNL	13:40	15:42	28:00	28:30
1012 FR_S	1003 FR_S	19:33	29:22	ÜNL	19:43	22:40	28:50	29:20
1109 FR_S	1109 FR_S	20:10	29:59	ÜNL	22:50	24:06	29:20	29:50
1103 FR_S	1012 FR_S	20:40	30:18	ÜNL	24:10	25:20	29:40	30:10
1104 FR_S	1008 FR_S	20:55	30:43	ÜNL	25:30	27:12	30:10	30:40
1004 FR_S	8006 FR_S	24:29	31:02	ÜNL	27:20	29:33	30:30	31:00

Tab. 10: Übersicht Ladeparameter LIS-Instanz 3 (GL)

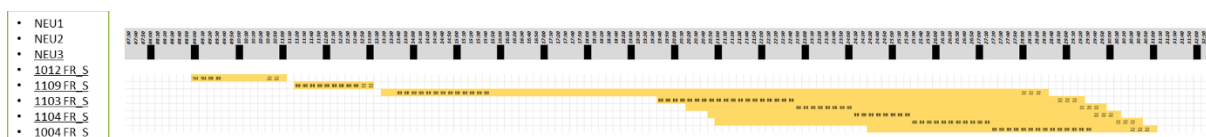


Abb. 52: Zeitverlauf Ladevorgänge LIS-Instanz 3 (GL)

LIS-Instanz Nr. 4 (GL)

LIS-Instanz 4: 8 Ladungen (GL)								
Umlaufname		Uhrzeit		Ladung	Ladung		Vorkonditionierung	
AN	AB	AN	AB	Typ	Start	Ende	Start	Ende
8006 FR_S	2232 FR_S	08:13	12:41	ZL	10:30	10:54	12:20	12:40
1733 FR_S	1105 FR_S	09:27	28:34	ÜNL	11:40	12:50	28:00	28:30
1435 FR_S	1005 FR_S	14:13	28:41	ÜNL	15:50	16:09	28:10	28:40
1005 FR_S	1102 FR_S	19:54	29:28	ÜNL	20:04	23:17	28:50	29:20
1010 FR_S	1013 FR_S	20:11	30:00	ÜNL	23:20	24:30	29:30	30:00
1002 FR_S	1106 FR_S	20:41	30:21	ÜNL	24:40	26:42	29:50	30:20
1003 FR_S	8037 FR_S	20:56	30:47	ÜNL	26:50	28:09	30:10	30:40
1001 FR_S	1704 FR_S	24:32	31:10	ÜNL	28:40	30:32	30:40	31:10

Tab. 11: Übersicht Ladeparameter LIS-Instanz 4 (GL)

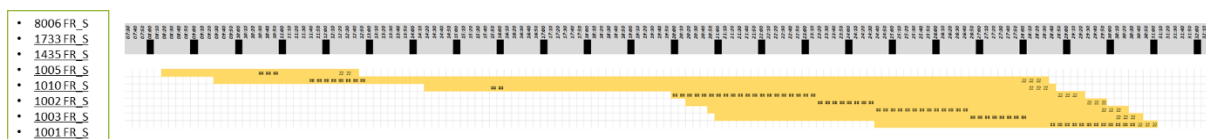


Abb. 53: Zeitverlauf Ladevorgänge LIS-Instanz 4 (GL)

LIS-Instanz Nr. 5 (GL)

LIS-Instanz 5: 7 Ladungen (GL)								
Umlaufname		Uhrzeit		Ladung	Ladung		Vorkonditionierung	
AN	AB	AN	AB	Typ	Start	Ende	Start	Ende
2133 FR_S	8034 FR_S	08:26	12:52	ZL	11:00	11:46	12:30	12:50
1431 FR_S	1702 FR_S	09:07	28:21	ÜNL	10:00	10:48	27:50	28:20
8034 FR_S	1103 FR_S	15:55	29:04	ÜNL	16:10	16:59	28:30	29:00
1107 FR_S	1031 FR_S	20:00	29:30	ÜNL	20:10	21:21	29:00	29:30
1013 FR_S	1431 FR_S	20:19	30:09	ÜNL	21:30	24:49	29:30	30:00
1108 FR_S	1009 FR_S	20:43	30:21	ÜNL	24:50	26:12	29:50	30:20
1009 FR_S	1733 FR_S	21:11	30:48	ÜNL	26:20	29:45	30:10	30:40

Tab. 12: Übersicht Ladeparameter LIS-Instanz 5 (GL)

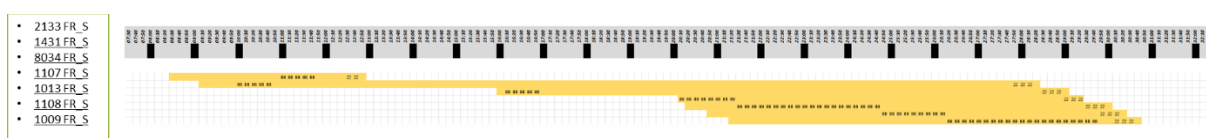


Abb. 54: Zeitverlauf Ladevorgänge LIS-Instanz 5 (GL)

LIS-Instanz Nr. 6 (GL)

LIS-Instanz 6: 7 Ladungen (GL)								
Umlaufname		Uhrzeit		Ladung	Ladung		Vorkonditionierung	
AN	AB	AN	AB	Typ	Start	Ende	Start	Ende
2801 FR_S	1435 FR_S	08:28	13:14	ZL	11:50	12:34	12:50	13:10
1432 FR_S	1004 FR_S	09:22	28:26	ÜNL	10:50	11:38	27:50	28:20
1710 FR_S	1011 FR_S	16:03	29:06	ÜNL	17:00	18:40	28:30	29:00
1703 FR_S	NEU2	20:03	29:37	ÜNL	20:13	20:45	29:00	29:30
2232 FR_S	2201 FR_S	20:21	30:10	ÜNL	20:50	24:01	29:40	30:10
1702 FR_S	1432 FR_S	20:46	30:24	ÜNL	24:10	25:24	29:50	30:20
1105 FR_S	NEU1	21:33	30:51	ÜNL	25:30	27:17	30:20	30:50

Tab. 13: Übersicht Ladeparameter LIS-Instanz 6 (GL)

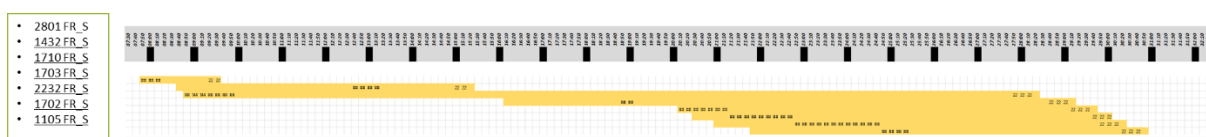


Abb. 55: Zeitverlauf Ladevorgänge LIS-Instanz 6 (GL)

LIS-Instanz Nr. 7 (SL)

LIS-Instanz 7: 7 Ladungen (SL)								
Umlaufname		Uhrzeit		Ladung	Ladung		Vorkonditionierung	
AN	AB	AN	AB	Typ	Start	Ende	Start	Ende
2901 FR_S	NEU1SL	08:10	12:43	ZL	08:20	08:32	12:20	12:40
8004 FR_S	1708 FR_S	16:20	28:52	ÜNL	16:30	17:36	28:20	28:50
NEU4SL	1304 FR_S	20:07	29:25	ÜNL	20:17	23:09	28:50	29:20
1205 FR_S	1201 FR_S	21:37	29:49	ÜNL	23:10	25:51	29:10	29:40
2802 FR_S	2901 FR_S	23:28	30:44	ÜNL	26:00	26:42	30:10	30:40
1204 FR_S	8002 FR_S	24:19	31:13	ÜNL	26:50	29:15	30:40	31:10
1705 FR_S	8004 FR_S	24:37	32:04	ÜNL	29:20	31:32	31:32	32:02

Tab. 14: Übersicht Ladeparameter LIS-Instanz 7 (SL)

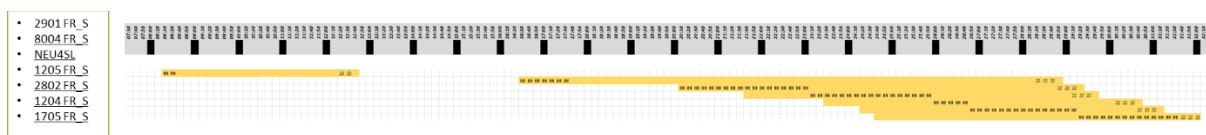


Abb. 56: Zeitverlauf Ladevorgänge LIS-Instanz 7 (SL)

LIS-Instanz Nr. 8 (SL)

LIS-Instanz 8: 7 Ladungen (SL)								
Umlaufname		Uhrzeit		Ladung	Ladung		Vorkonditionierung	
AN	AB	AN	AB	Typ	Start	Ende	Start	Ende
1707 FR_S	1410 FR_S	08:17	13:00	ZL	08:27	08:54	12:40	13:00
8001 FR_S	1707 FR_S	14:45	28:12	ÜNL	14:55	16:01	27:40	28:10
8003 FR_S	1205 FR_S	16:15	28:49	ÜNL	16:25	17:31	28:10	28:40
1436 FR_S	2601 FR_S	18:58	28:52	ÜNL	19:08	20:09	28:20	28:50
1202 FR_S	2501 FR_S	21:06	29:25	ÜNL	21:16	23:45	28:50	29:20
1201 FR_S	NEU2SL	21:47	30:16	ÜNL	23:50	26:24	29:40	30:10
NEU1SL	1706 FR_S	24:07	31:00	ÜNL	26:30	28:31	30:30	31:00

Tab. 15: Übersicht Ladeparameter LIS-Instanz 8 (SL)

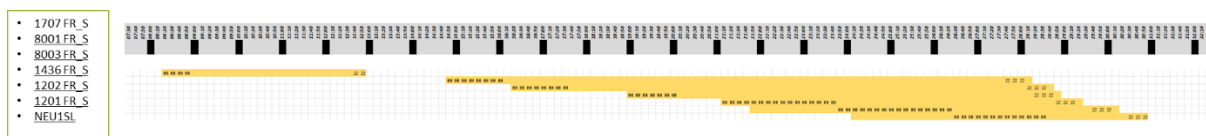


Abb. 57: Zeitverlauf Ladevorgänge LIS-Instanz 8 (SL)

LIS-Instanz Nr. 9 (SL)

LIS-Instanz 9: 7 Ladungen (SL)								
Umlaufname		Uhrzeit		Ladung	Ladung		Vorkonditionierung	
AN	AB	AN	AB	Typ	Start	Ende	Start	Ende
1706 FR_S	1436 FR_S	09:03	13:15	ZL	09:13	09:45	12:50	13:10
8002 FR_S	1202 FR_S	14:45	28:48	ÜNL	14:55	16:01	28:10	28:40
1410 FR_S	NEU4SL	19:28	28:55	ÜNL	19:38	20:46	28:20	28:50
1304 FR_S	NEU3SL	21:09	29:31	ÜNL	21:19	24:19	29:00	29:30
NEU3SL	1705 FR_S	22:09	30:17	ÜNL	24:20	25:21	29:40	30:10
2701 FR_S	2802 FR_S	24:09	31:05	ÜNL	25:30	25:43	30:30	31:00
2501 FR_S	8003 FR_S	24:25	31:59	ÜNL	28:30	31:29	31:29	31:59

Tab. 16: Übersicht Ladeparameter LIS-Instanz 9 (SL)

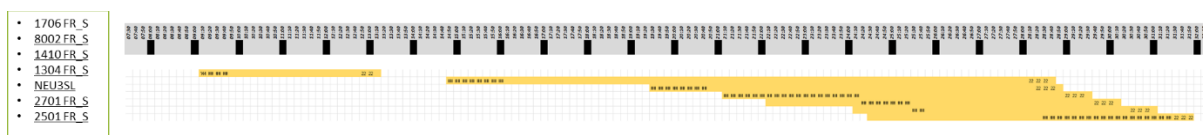


Abb. 58: Zeitverlauf Ladevorgänge LIS-Instanz 9 (SL)

LIS-Instanz Nr. 10 (SL)

LIS-Instanz 10: 6 Ladungen (SL)								
Umlaufname		Uhrzeit		Ladung	Ladung		Vorkonditionierung	
AN	AB	AN	AB	Typ	Start	Ende	Start	Ende
NEU2SL	NEU2SL	15:56	18:04	ZL	16:06	17:56	17:56	18:04
NEU3SL	NEU3SL	18:07	20:04	ZL	18:17	20:03	20:03	20:04
1708 FR_S	1203 FR_S	19:57	29:14	ÜNL	20:10	20:52	28:40	29:10
1203 FR_S	1204 FR_S	21:29	29:44	ÜNL	21:39	24:07	29:10	29:40
NEU2SL	2701 FR_S	22:39	30:21	ÜNL	24:10	25:04	29:50	30:20
2601 FR_S	8001 FR_S	24:10	31:13	ÜNL	25:10	26:00	30:40	31:10

Tab. 17: Übersicht Ladeparameter LIS-Instanz 10 (SL)

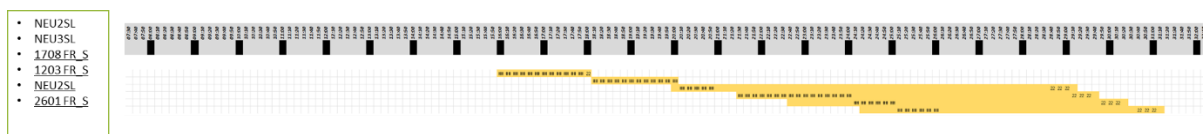


Abb. 59: Zeitverlauf Ladevorgänge LIS-Instanz 10 (SL)

2 AP 2 Unterstützung zur Überholung von IT-Systemen

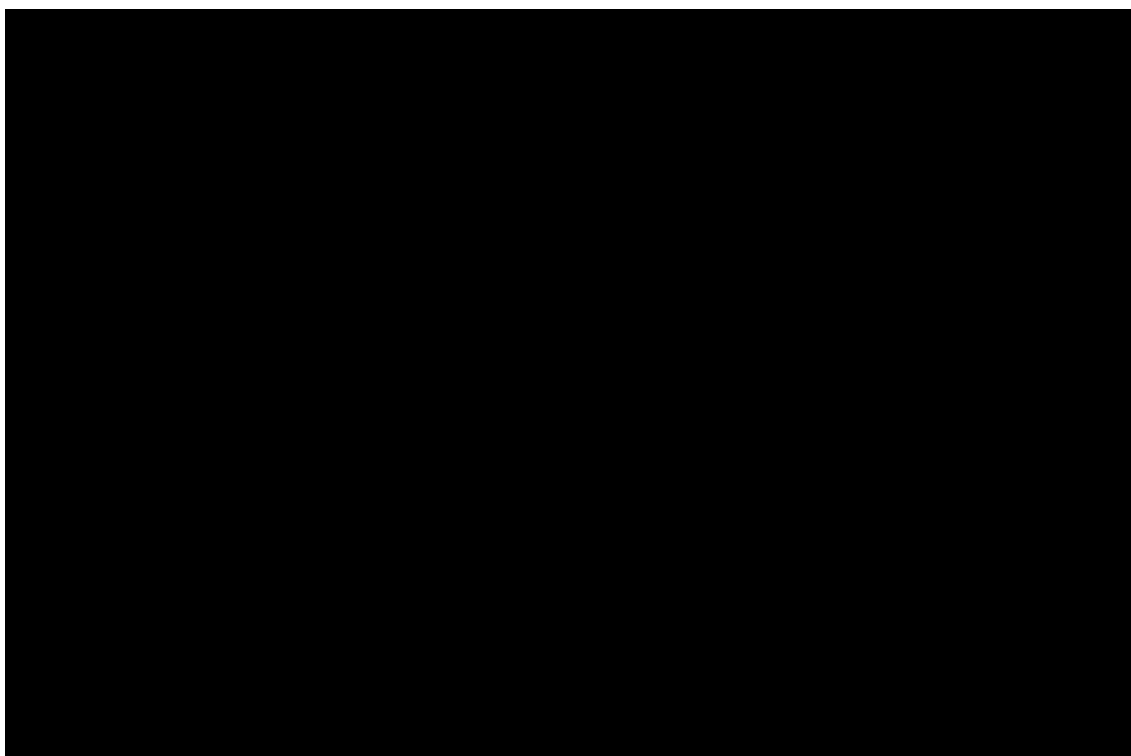
IT-Systeme spielen auch heute schein eine entscheidende Rolle bei der Betriebsführung im ÖPNV. Im Zuge der Flottenelektrifizierung wird der Stellenwert sogar noch steigen. Einerseits werden zusätzliche Funktionen wie das Lademanagement Einzug erhalten, die einen deutlichen Mehrwert auf Betreiberseite erzeugen können. Andererseits ermöglichen IT-Systeme die Optimierung von Umlaufgestaltung, Fahrzeugdisposition und ähnlichen, um den Übergang vom Diesel- zum Elektroantrieb so reibungslos wie möglich zu gestalten.

2.1 AP 2.1 Konzeption einer IT-Systemarchitektur

Status Quo

Aktuell setzt die KVG zu Planungs- und Überwachungszwecken die IVU.suite der Firma IVU sowie das Viriciti-System ein. Die Softwarelandschaft wird darüber hinaus um eigens von der KVG entwickelte Tools ergänzt, die zum Beispiel auf Basis von MS Excel erstellt sind.

Über die IVU.suite wird aktuell die Fahrplan- und Einsatzplanung abgewickelt. In diesem Kontext bedient die Software auch die IBIS-Peripherie mit den erforderlichen Daten. Per Datenlogger werden die Fahrzeugbetriebsdaten erhoben und über das Viriciti-System verwaltet und verarbeitet. Dies umfasst neben Normalbetriebsdaten selbstverständlich auch Störungs- und Fehlermeldungen, weshalb das System auch zur Fehlerdiagnose und zur Organisation der vorbeugenden und korrektiven Wartung eingesetzt wird.



Möglicher Zielausbau

Im Zuge der Flottenelektrifizierung wird der Fokus der IT-Systeme um den Aspekt Ladeinfrastruktur erweitert. Dies umfasst sowohl Ladeinfrastruktur im Depot als auch „auf Linie“ an ausgewählten Wendestellen. Die Auswirkungen strahlen auf mehrere Softwarekomponenten aus. Die resultierenden Kernanforderungen an die Einzelsysteme sind im Folgenden kurz umrissen.

- Betriebsleitsystem (ITCS)

Das ITCS (von engl. Intermodal Transport Control System) muss auf die Anforderungen der neuen Antriebstechnik angepasst werden, damit die relevanten Statusinformationen von Elektrobussen erfasst und verarbeitet werden können. Dies betrifft beispielsweise Kerndaten wie Batterieladestand, verbleibende Reichweite, geplante Einrückzeit sowie mögliche Warn- und Fehlermeldungen. Die Daten werden vom Betriebshofmanagementsystem empfangen, verarbeitet und beispielsweise als Inputgröße an das Lademanagementsystem weitergegeben.

- Fahr- und Umlaufplanungssystem

Alternative Antriebe weisen besondere Eigenschaften auf, die relevant für die Fahrplanung und Umlaufplanung sind. Aufgrund der gegenüber Dieselnissen deutlich reduzierten Reichweite, ist insbesondere dieser Umstand maßgeblich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Reichweite nicht ganzjährig konstant ist, sondern deutlich von den Umgebungsbedingungen (primär Außentemperatur) abhängt.

Das Fahr- und Umlaufplan System muss geeignet sein, die Umläufe entsprechend der Anforderungen aus dem Elektrobusbetrieb zu gestalten. Dabei muss sichergestellt sein, dass die Fahrzeuge die erforderlichen Reichweiten bei den tatsächlich gegebenen Witterungsbedingungen erfüllen können. Sofern erforderlich, müssen ausreichende Aufenthaltsdauern auf dem Betriebshof beziehungsweise an den Endhaltestellen mit Ladeinfrastruktur gewährleistet werden, um Energie im ausreichenden Maß zuzuführen.

Das Plansystem muss dafür nicht zwingend geändert werden, sofern durch den Bediener sichergestellt ist, dass die Randbedingungen erfüllt sind. Alternativ ist zu prüfen, inwiefern sogenannte Elektrobis-Module oder Elektrobis-Funktionskataloge für das bestehende System nachrüstbar sind.

- Werkstattmanagement

Elektrobisse sind gegenüber Dieselnissen außerhalb der Betriebszeiten weniger flexibel, da diese Zeit zur Batterieladung genutzt werden muss. Gleichzeitig sind Ladesysteme in der Werkstatt einerseits häufig kleiner dimensioniert und andererseits kann eine Ladung parallel zum Werkstattaufenthalt aufgrund der durchgeführten Maßnahmen nicht möglich sein.

In einem adäquaten Werkstattmanagementsystem können die relevanten Begleitumstände betrachtet und berücksichtigt werden, so dass zum Beispiel ein Nachladeintervall im Ablauf berücksichtigt wird. Geplante Servicemaßnahmen können in den Betriebshof- und Lademanagementsystemen als geplante Ausfallzeiten berücksichtigt werden, wobei die Einsatzplanung entsprechend angepasst wird. Im Zusammenspiel zwischen Werkstatt- und Betriebshofmanagementsystem können Reibungsverluste minimiert werden.

- Betriebshofmanagementsystem

Mit anwachsenden Elektrobusflotten erlangt das Betriebshofmanagementsystem (BHMS) eine besondere Bedeutung. Das System legt zum Beispiel fest, an welchem Ladeplatz ein Fahrzeug laden soll. Bei Mehrfach-Ladeinfrastruktur (sog. Matrix-Ladeinfrastruktur) ist diese Zuordnung besonders wichtig, da sich mehrere Ladeplätze dieselbe Infrastruktur teilen. In diesem Kontext muss sichergestellt sein, dass jeder Bus eine ausreichende Ladeleistung beziehen kann, um zum Ausrückzeitpunkt den erforderlichen Batterieladestand aufzuweisen.

Gleichzeitig muss gewährleistet sein, dass die An- und Abfahrtswege zu oder von den Ladepunkten frei sind. Bei Blockaufstellung kann ein noch ladendes Fahrzeug die Abfahrt von Fahrzeugen aus derselben Spur blockieren. Um diesen Aspekt in der Ladeplatzzuweisung zu berücksichtigen, muss ein Datenaustausch zwischen BHMS, ITCS, Lademanagementsystem und Dispositionssystem erfolgen. Der Ladestand beim Einrücken muss bei der Ladeplatzzuweisung ebenso berücksichtigt werden, wie der geplante Folgeeinsatz – inklusive Abfahrtszeit und benötigtem Ladestand bei Abfahrt.

Über das Lademanagementsystem wird erhoben, welche Ladeplätze frei sind und welche Leistungskapazitäten in dem zugehörigen Matrix-Ladesystem verfügbar sind. Bei Auswertung aller Informationen kann die Abstellung abgestimmt auf die Einsatzanforderungen erfolgen.

- Dispositionssystem

Das Dispositionssystem organisiert, welche Umläufe von welchem Fahrzeug bedient werden. Hierbei muss sichergestellt sein, dass das System mit dem Betriebshofmanagementsystem und anderen Systemelementen vollständig kompatibel ist.

Über die Zuordnung von Umläufen zu Folgeumläufen gibt das Dispositionssystem letztlich vor, wie lange ein Fahrzeug im Betriebshof ist und wann es geladen werden kann. Das Betriebshofmanagementsystem hingegen gibt vor, an welchem Platz das Fahrzeug geladen wird. Im Zusammenspiel legen die beiden Managementsystemen die Randbedingungen für das Lademanagementsystem fest.

Das Dispositionssystem eignet sich als sehr zentral angesiedeltes Managementsystem, um eine gute Flottenübersicht zu geben. Als zentrales System ist das Dispositionssystem an alle relevanten Systemkomponenten per Schnittstellen angebunden und kann die Rolle eines übergeordneten Managementsystems übernehmen.

- Lademanagementsystem

Das Lademanagementsystem verwaltet die Abläufe der Ladeinfrastruktur, indem beispielsweise Ladevorgänge zu einem gewissen Zeitpunkt freigegeben werden, Ladeleistungen zeitweise limitiert werden oder Vorkonditionierungsvorgänge initiiert werden.

Um dies zu gewährleisten, muss sichergestellt sein, dass die Software die reale Ladeinfrastruktur modellhaft abbilden kann. Dies gilt insbesondere beim Einsatz von Mehrfach-Ladeinfrastrukturen, bei denen die Leistungsabgabe abhängig von der Anzahl ladender Fahrzeuge ist. Das Lademanagementsystem muss in der Lage sein, die Ladeabläufe zu prognostizieren, einen optimierten Verlauf zu erstellen und zu berechnen, ob alle Ladevorgänge rechtzeitig beendet werden.

Zusätzlich überwacht das Lademanagementsystem die insgesamt resultierende Netzlast aller Matrix-Ladesysteme im Verbund. Die einzelnen Ladevorgänge werden dabei so organisiert, dass neben der Hauptanforderung „rechtzeitiges Vollladen“ auch die Lastspitze auf ein Minimum reduziert wird. Sofern die Tarifgestaltung es ermöglicht, können Ladevorgänge gezielt in „Tiefpreiszonen“ verschoben werden, wenn vergünstigte Konditionen angeboten werden.

Das Lademanagementsystem muss imstande sein, den Lastgang abhängig von vorgegebenen Randbedingungen tatsächlich zu optimieren. Die Optimierung sollte dabei aktiv, also über eine gezielte Verschiebung der Ladeintervalle erfolgen, um einen maximalen Optimierungsgrad zu erzielen. Insbesondere bei Mehrfach-Ladeinfrastruktur ist dieses Verfahren komplexer Natur, so dass der Lastmanagement-Algorithmus vor Einführung kritisch beleuchtet werden muss. Vielfach werden Systeme als Lademanagementsysteme beworben, die streng genommen keine optimierenden Aufgaben übernehmen. Vielmehr wird nur die Maximalleistung begrenzt und über ein Prioritätensystem entschieden, welcher Ladevorgang verzögert wird. Dies erfolgt ohne weitere Berücksichtigung der Abfahrtszeitpunkte und ist für den ÖPNV nur sehr bedingt geeignet. Bei Einsatz eines entsprechenden Systems muss an anderer Stelle sichergestellt sein, dass die Funktionsweise den Ansprüchen genügt.

Im Zusammenspiel mit den BHMS muss sichergestellt sein, dass die Ladeplätze mit den nächsten geplanten Abfahrtszeiten priorisiert geladen werden. Üblicherweise sind dies die vorderen Stellplätze in der Blockaufstellung. Fahrzeuge, die erst später Ausrücken, können hingegen später oder mit geringerer Leistung geladen werden.

Die Ladedauer muss vom System bereits vor Einrücken eines Fahrzeugs anhand der aus dem ITCS vorliegenden Daten prognostiziert werden, um den Ladeplan für die gesamte Flotte optimieren zu können. Dieser Ladeplan wird laufend verifiziert und optimiert, um Verspätungen oder Fahrzeugausfälle zu berücksichtigen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Systeme mit ihren Schnittstellen in der Übersicht:

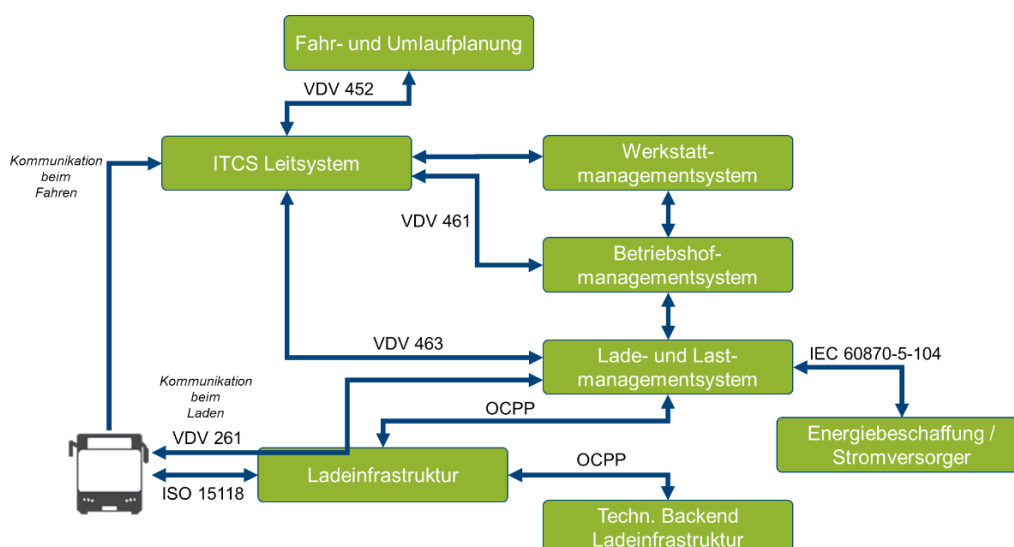


Abb. 61: Mögliches Zielszenario

2.2 AP 2.2 Strategieentwicklung zur Anschaffung neuer Software

Im Bereich ÖPNV-ITCS wird der deutsche Markt vor allem durch die großen Player init, IVU, PSI und Trapeze beherrscht. Weitere kleinere Anbieter komplettieren die Angebote. Jedes der genannten Unternehmen hat bereits ein „E-Bus-Modul“ bzw. eine Lösung für Elektrobusse in seinem Produktportfolio. Der Markt wird jüngst auch aus dem Feld der Hersteller von Ladeinfrastrukturen bedient. Die Erfahrungen aus dem abschließenden Systemglied, der Ladeinfrastruktur selbst, werden hier im Sinne eines Bottom-Up Ansatzes nach oben skaliert, während die großen Stakeholder nach der Top-Down-Methode die bekannten Managementroutinen auf die Anforderungen der neuen Technik anpassen.

Es empfiehlt sich, zunächst zu evaluieren, welche Lösungen von den bei der KVG bereits eingesetzten Herstellern eingekauft werden können und welche Leistung diese Add-Ons erfüllen. Es gilt darüber hinaus zu untersuchen, ob der Leistungsumfang dem Anforderungsprofil entspricht, oder ob eine Softwarelösung von einem Drittanbieter zugekauft werden muss.

Abschließend muss entschieden werden, ob das System einen hohen Automatisierungsgrad erfordert (beispielsweise bei häufig wechselnden Anforderungen) oder ob diverse Vorarbeiten manuell erbracht werden können (z. B. bei regelmäßig wiederholten Betriebsabläufen). Bei gut planbaren (konstanten) Betriebsabläufen können auch einfachere Systemansätze den Anforderungen genügen.

Da viele Strukturen „gewachsen“ sind und auch einige IT-Tools von der KVG selbst erstellt wurden, bietet sich ein ausführlicher Industriedialog an, bevor ein Lastenheft für das Zielsystem erstellt wird. Der Industriedialog soll folgende Ziele verfolgen:

- Welcher Lieferant bietet welche Lösungen bzw. Module an?
- Welche standardisierten und nicht standardisierten Schnittstellen werden verwendet?
- On-premise oder Cloud-Lösung?
- Kann das System mit der wachsenden E-Bus Flotte ausgebaut werden?
- Unterstützt das System mehrere Betriebshöfe und ausgelagerte Schnellladepunkte im Netz?
- Gibt es zukunftssichere, idealerweise standardisierte oder offen gelegte Schnittstellen für zukünftige Erweiterungen (z.B. Energieeinkauf, Berücksichtigung eigener PV-Anlagen)?
- Passt die Benutzeroberfläche zu den Anforderungen der KVG-Fachabteilungen?
- Anschaffungs- und laufende Kosten
- Ist es sinnvoll den IT-Ausbau auf den bestehenden Systemen fortzusetzen, oder macht es mehr Sinn eine vollständig neue IT-Infrastruktur aufzusetzen?

Im Rahmen des Industriedialogs sollten insbesondere auch andere ÖPNV-Unternehmen besucht werden, um Erfahrungsberichte direkt aus dem Praxiseinsatz zu beziehen.

Nach dem Industriedialog kann dann die Erarbeitung des Lastenheftes mit der anschließenden Ausschreibung erfolgen. Um die Investitionskosten zu reduzieren, sollte ebenfalls Kontakt mit dem Land Hessen aufgenommen werden, um etwaige Förderungsoptionen zu evaluieren.

3 AP 3 Auswirkung der Umstellung auf Betrieb und Umwelt

3.1 AP 3.1 Gesamtkosten und Umweltkosten

3.1.1 Investitionen

Im Rahmen von AP 3.1 wurden die umweltbezogenen Aspekte zusammengefasst. Alle weiteren kommerziellen Aspekte sind in AP 3.3 integriert.

3.1.2 CO₂ Emissionen

Zur Berechnung der CO₂ Emissionen werden die Laufleistungen aus dem Jahr 2022 herangezogen. Die Anteile an Gelenk- und Solobussen wurden anhand des aktuellen Bestands hergeleitet und die Laufleistungen entsprechend skaliert. Für den Kraftstoffverbrauch wurden Flottenmittelwerte angesetzt mit:

- Solobus: 38 l/100 km
- Gelenkbus: 45 l/100 km

Im Folgenden wird entsprechend dem Dekarbonisierungsplan angesetzt, dass für jeden neu beschafften Batteriebus ein Dieselfahrzeug außer Betrieb gesetzt wird. Die CO₂ Emissionen eines Dieselfusses werden mit 3,63 kg CO₂ pro Liter Diesel berechnet. Für das emissionsfreie Pendant wird ein regenerativer Energiebezug vorausgesetzt, so dass die resultierenden CO₂ Emissionen für Batteriebusse gleich Null sind.

Aufgrund der sukzessiven Flottenumstellung sinken die flottenweiten Emissionswerte analog zum Beschaffungsplan ab. Als Vergleichsgröße ist in der folgenden Grafik auch der aktuelle Emissionswert fortgeschrieben.

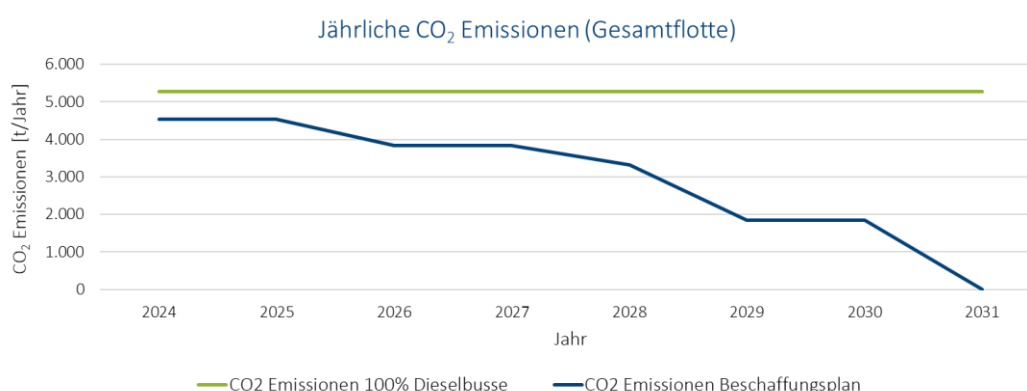


Abb. 62: Jährliche CO₂ Emissionen (Gesamtflotte)

Es ist ersichtlich, dass die Spanne zwischen beiden Graphen über die Jahre weiter anwächst, bis die Flotte vollständig umgestellt und der Betrieb entsprechend dekarbonisiert ist. Der Verlauf nach Beschaffungsplan startet bereits unter dem Referenzwert, da im Jahr 2024 bereits die MEKS-Busse den Betrieb aufgenommen haben und somit ein emissionsfreier Flottenteil vorhanden ist.

Die dazugehörigen Emissionswerte sind hier folgend auch tabellarisch zusammengefasst.

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
<i>CO₂ Emissionen Dieselflotte [t]</i>	5.279	5.279	5.279	5.279	5.279	5.279	5.279	5.279
<i>CO₂ Emissionen Beschaffungsplan [t]</i>	4.527	4.527	3.826	3.826	3.316	1.849	1.849	0
<i>CO₂ Einsparung [t]</i>	752	752	1.453	1.453	1.963	3.430	3.430	5.279

Tab. 18: Jährliche CO₂ Emissionen (Gesamtflotte)

Bei kumulierter Betrachtung zeigt sich das Einsparpotenzial am deutlichsten. Durch den sukzessiven Dekarbonisierungsprozess stagniert die Emissionskurve nach Beschaffungsplan graduell, bis sie im Jahr 2031 auf einen konstanten Wert limitiert wird, da keine weiteren CO₂ Emissionen ausgestoßen werden. Im Gegensatz dazu steigt die Emissionskurve für die Dieselflotte (Referenzwert) kontinuierlich weiter an, da hier ein jährlicher Ausstoß von 5.279 t CO₂ weiterhin unterstellt wird.

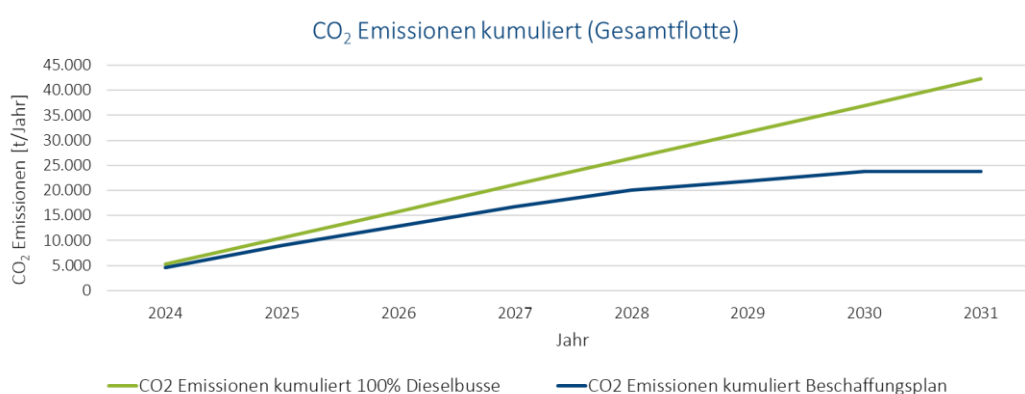


Abb. 63: Kumulierte CO₂ Emissionen (Gesamtflotte)

Im Jahr 2031 liegt bereits ein kumuliertes Einsparpotenzial von mehr als 18.000 t CO₂ vor. Dieser Wert wächst in der Folge jährlich um mehr als 5.000 t CO₂ an.

3.1.3 Umweltkosten

Aufgrund der eingesetzten höherpreisigen Technik weisen emissionsfreie Fahrzeuge höhere Marktpreise auf als aktuelle Dieselbusse. Dies gilt insbesondere, wenn der Aspekt der Infrastruktur in die Bilanz aufgenommen wird. Förderprogramme bieten zwar die Möglichkeit, den Kostendruck zu reduzieren, jedoch bleibt das Preisgefüge höher. Das gesellschaftliche Ziel ist die Reduktion von Emissionen, was aktuell nur zu einem höheren Preis gegenüber konventioneller Technik möglich ist. Gleichzeitig hat auch das Einsparen von Emissionen einen Wert für die Gesellschaft, der an dieser Stelle bewertet werden soll. Der Ausstoß von Emissionen wirkt sich negativ auf Klima, Gesellschaft und Bevölkerung aus. In der Folge stehen resultierende Kosten, die sich in diversen Bereichen niederschlagen. Angefangen bei Mehraufwendungen im Gesundheitssystem bis hin zu korrektiven Maßnahmen, um Auswirkungen des Klimawandels zu bekämpfen. Um diese Aufwendungen monetär zu bilanzieren, werden die Umweltkosten bestimmt.

Für die Bundesrepublik Deutschland werden die Umweltkosten sowie eine Empfehlung zu deren Berechnung in einer Methodenkonvention definiert. Diese wird vom Umweltbundesamt herausgegeben und liegt aktuell in der Version 3.1⁹ vor. Es werden dort Berechnungsmethoden und Kennzahlen für Umweltkosten verschiedener Antriebe vermittelt. Die gesamten Umweltkosten setzen sich aus den Umweltkosten für Treibhausgase, Luftschadstoffe, Lärm, Infrastruktur, Fahrzeuge, Energiebereitstellung, Flächenverbrauch und für Zerschneidung zusammen. Dadurch können die Umweltkosten verschiedener Antriebsarten miteinander verglichen werden. Außerdem wird ersichtlich, welche Faktoren die Umweltkosten der jeweiligen Antriebe geringhalten bzw. in die Höhe treiben.

Die Berechnungen finden vor dem Hintergrund verschiedener Zeitpräferenzraten statt. In der Methodenkonvention wird zwischen einer 0%-igen reinen Zeitpräferenzrate und einer 1%-igen reinen Zeitpräferenzrate unterschieden. Eine 0%-ige reine Zeitpräferenzrate sagt aus, dass eine Gleichgewichtung von Umweltschäden zum heutigen Zeitpunkt und Umweltschäden zu einem Zeitpunkt in der Zukunft angenommen werden. Ein Umweltschaden zum heutigen Zeitpunkt hat nach dieser Methode das identische Gewicht wie ein Umweltschaden, der in der Zukunft eintritt. Demnach sind heute und zukünftig verursachte Umweltschäden mit demselben Aufwand zu bekämpfen. Im Gegensatz dazu steht die 1%-ige reine Zeitpräferenzrate. Hierbei wird angenommen, dass Umweltschäden zum heutigen Zeitpunkt höhere Umweltkosten verursachen als Umweltschäden, die zu einem zukünftigen Zeitpunkt eintreten. Somit ist eine Kompensierung von heute angerichteten Umweltschäden mit höherem Aufwand zu bekämpfen als solche, die in der Zukunft entstehen. Dies wird aufgrund zunehmender Reife und Effizienz der korrektiven Methoden und Maßnahmen angenommen. Aus der Verwendung unterschiedlicher reinen Zeitpräferenzraten resultieren unterschiedliche Kostensätze. Die Verwendung der 1%-igen reinen Zeitpräferenzrate wird bei praktischer Politikrelevanz empfohlen, weshalb sie auch im weiteren Verlauf dieses Dokuments Anwendung findet.

Alle hier verwendeten Kostensätze und Aussagen basieren auf einer 1%-igen reinen Zeitpräferenzrate und auf den in der Methodenkonvention 3.1 genannten Vorgaben. Zur

⁹ Vgl. Bünger, Björn; Matthey, Astrid: Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze, in: [umweltbundesamt.de](https://www.umweltbundesamt.de), 2020, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-umweltkosten/> (abgerufen am 07.07.2023)

Ermittlung der Umweltkosten der KVG wurden die dort angegebenen Kosten pro Kilometer sowie die durch die KVG übermittelten Daten herangezogen. Es wird außerdem vorausgesetzt, dass jeder Dieselbus sukzessive durch einen Elektrobus ersetzt wird, wonach die gesamte Flotte im Jahr 2030 vollelektrisch betrieben wird. Die Umweltkosten für batterieelektrisch angetriebene Busse werden eigenständig ermittelt, da diese nicht in der Methodenkonvention 3.1 vorzufinden sind. Der Faktor Lärm wird bei der Berechnung der Umweltkosten der beiden Antriebsarten nicht berücksichtigt. Außerdem wird bei der Berechnung der Umweltkosten zur Bereitstellung des für den Vortrieb notwendigen elektrischen Stroms angenommen, dass dieser aus Wind und Photovoltaik gewonnen wird. Würde hier Strom gemäß dem aktuellen deutschen Strommix angesetzt, wäre der Betrag der Umweltkosten zur Energiebereitstellung etwa dreimal so hoch wie hier berechnet. Darüber hinaus wird bei der Berechnung der Umweltkosten angenommen, dass die Umweltkosten für Luftschadstoffe durch Abrieb, für Infrastruktur und Fahrzeuge sowie für Flächenverbrauch beider Antriebsarten identisch sind.

Da die Umweltkosten in erster Näherung proportional zu den CO₂ Emissionen sind, liegt erwartungsgemäß ein ähnlicher Kurvenverlauf vor, wie bei den CO₂ Emissionen im vorherigen Kapitel. Jedoch steigen die Umweltkosten pro Jahr leicht an, auch wenn der Ausstoß konstant bleibt, weshalb der Referenzwert „100 % Diesel“ hier eine Steigung aufweist.

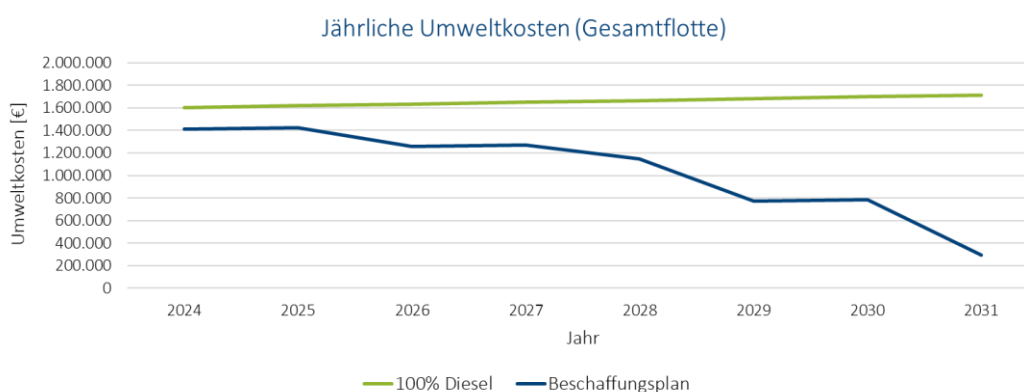


Abb. 64: Jährliche Umweltkosten (Gesamtflotte)

In Summe kann aber auch hier ein Werteverlauf beobachtet werden, bei dem die Umweltkosten nach Beschaffungsplan sukzessive Abfallen und die Einsparung anwachsen lassen. Die Zahlenwerte sind in der folgenden Tabelle ebenfalls aufgeführt.

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
<i>Umweltkosten Dieselflotte [M€]</i>	1,60	1,62	1,63	1,65	1,67	1,68	1,70	1,71
<i>Umweltkosten Beschaffungsplan [M€]</i>	1,41	1,42	1,26	1,27	1,15	0,78	0,78	0,29
<i>Umweltkosten Einsparung [M€]</i>	0,19	0,19	0,38	0,38	0,52	0,91	0,92	1,42

Tab. 19: Jährliche Umweltkosten (Gesamtflotte)

Auch bei der kumulierten Betrachtung wird ein ähnlicher Verlauf erzeugt, wie bei der Berechnung der CO₂ Emissionen. Der Unterschied im Verlauf liegt hier im Detail. Einerseits steigen die

Umweltkosten für den fortgesetzten Dieselfbetrieb pro Jahr an. Der grüne Graph weist also eine über die Jahre anwachsende Steigung auf, was in der Grafik kaum erkennbar ist.

Gleichzeitig sind die Umweltkosten einer vollständig dekarbonisierten Flotte zwar um einiges geringer als bei Fortnutzung der Dieselflotte, jedoch wird der Wert Null nicht erreicht. Dies geht darauf zurück, dass Emissionen nicht ausschließlich durch den Fahrzeugantrieb verursacht werden. Faktoren wie Abrieb, Flächenverbrauch und Lärm fließen weiterhin in die Berechnung ein.

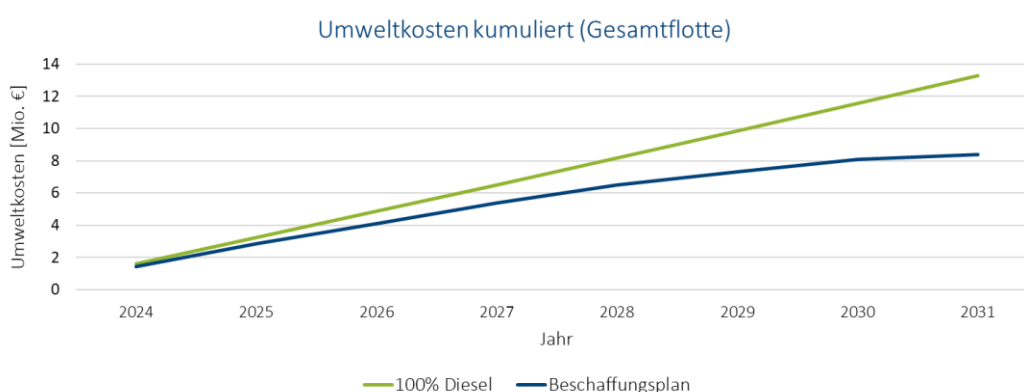


Abb. 65: Kumulierte Umweltkosten (Gesamtflotte)

Bereits im Jahr 2031 kann ein Einsparpotenzial von knapp 5 Millionen Euro Umweltkosten abgelesen werden. Auch wenn die Umweltkosten im elektrischen System nicht Null werden, steigen die Umweltkosten für die Dieselflotte pro Jahr stärker an als für BEV. In der Folge steigt das jährliche Einsparpotenzial. Ab dem Jahr 2031 wächst das kumulierte Einsparpotenzial also um mehr als 1,4 Millionen Euro jährlich an.

Der Vollständigkeit halber sind auch hier die Zahlenwerte bis zum Jahr 2031 tabellarisch zusammengetragen.

	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031
Kum. Umweltkosten Dieselflotte [M€]	1,60	3,22	4,86	6,51	8,17	9,86	11,55	13,27
Kum. Umweltkosten Beschaffungsplan [M€]	1,41	2,84	4,09	5,37	6,52	7,29	8,08	8,37
Kum. Umweltkosten Einsparung [M€]	0,19	0,39	0,76	1,14	1,66	2,56	3,48	4,90

Tab. 20: Kumulierte Umweltkosten (Gesamtflotte)

3.2 AP 3.2 Migrationspfade und ökologischer Nutzen

Im Rahmen der Angebotserstellung wurde angenommen, dass verschiedene Migrationspfade zur Debatte stehen. Da die Dekarbonisierung der KVG-Flotte bereits auf das Zieljahr 2030 terminiert wurde, besteht hier kein Gestaltungsspielraum.

Hinweis

Das Jahr 2030 als Umstellungsziel wurde bereits im Rahmen der Ausschreibung (Angebotsaufforderung) definiert. Hier wird entsprechend angenommen, dass kein Gestaltungsspielraum vorliegt. In der Praxis kann das Umstellungsziel verschoben werden, wenn dies erforderlich ist und konform zu den Vorgaben der Stadt Kassel ist.

Sämtliche anstehenden Fahrzeugbeschaffungen müssen zwangsläufig emissionsfrei erfolgen, um die Flotte bis zum Jahr 2030 vollständig zu erneuern und emissionsfrei zu gestalten. Langsamere Umstellungsvarianten, wie beispielsweise die reine Erfüllung der CVD-Vorgaben, sind hier nicht relevant, weil das Kernziel bis 2030 nicht realisiert werden kann.

Neben der ausschließlichen Beschaffung von emissionsfreien Bussen „ab sofort“ muss auch die Ladeinfrastruktur analog aufgebaut werden. Im Depot bedeutet dies die Einplanung eines Ladeplatzes pro neu beschafftem Fahrzeug. Auch hier muss der Beschaffungsplan verfolgt werden. Die erforderlichen Installationszeitpunkte der Schnellladeinfrastruktur sind in Kapitel 1.7 AP 1.7 *Bewertung der Konzeptionsanalysen und Erstellung eines neuen Umlaufplans für ein exemplarisches Verkehrsmodell* im Detail dargestellt.

Der ökologische Nutzen ist unter AP 3.1 angesiedelt.

3.3 AP 3.3 Kommerzielle Analyse über Umstellungszeitraum

3.3.1 Methodik

Die ausgewählte Vorzugstechnologie (BEV mit Schnellladung an Wendestellen) für den geplanten Flottenumbau wird hier betriebswirtschaftlich beleuchtet. Ziel ist es, die Kosten in verschiedenen Szenarien für den Betrachtungszeitraum 2023 bis 2030 miteinander zu vergleichen. Als Vergleichsgröße zum aktuellen Status Quo wird ein Referenzszenario "100% Diesel" angeführt, das einer Fortsetzung des aktuellen Dieselbusbetriebs entspricht. Aufgrund geltender Vorschriften (CVD) handelt sich jedoch um ein rein fiktives Szenario, das in der Praxis nicht wie angesetzt realisiert werden kann.

Das Referenzszenario "100% Diesel" (RS) stellt die Fortschreibung des Status Quo dar. In diesem Szenario werden weiterhin ausschließlich Dieselbusse beschafft und betrieben. Durch den Vergleich mit Szenario 1 (S1: Elektrifizierung ohne Förderung) und Szenario 2 (S2: Elektrifizierung mit Förderung) für eine Flottenumstellung werden die Auswirkungen auf die Kosten und den Kosten- und Förderungsbedarf durch die Flottenumstellung präsentiert.

Die wirtschaftliche Analyse basiert auf den von der KVG zur Verfügung gestellten Kostenstellen und Investitionen. Diese sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

<i>Kostenstellen</i>	Treibstoffe (Diesel oder Strom)
	Wartung & Instandhaltung
	Batterietausch
	Fahrpersonalkosten
	Abschreibungen
<i>Investitionen</i>	Investition Fahrzeuge
	Investition Ladeinfrastruktur
	Fremdkapital (FK) Zinsaufwand

Tab. 21: Kosten- und Investitionsstruktur

Aus den von der KVG zur Verfügung gestellten Daten für die Geschäftsjahre 2022 und 2023 werden die entsprechenden Ausgaben der einzelnen Kostenstellen entnommen, um den Status Quo abzubilden. Dies dient insbesondere als Grundlage für die Fortschreibung der Ausgaben je Kostenstelle, entsprechend den betrachteten Szenarien. Vor der eigentlichen Wirtschaftlichkeitsanalyse werden die Prämissen und die zu berücksichtigenden Inputdaten definiert und quantifiziert. Diese lassen sich nach den Blöcken Investitionen und Kostenarten differenzieren. Es werden alle Kostenstellen identifiziert, in denen sich die durch die Umstellung Ausgaben in ihrer Art oder ihrem Umfang ändern. Alle Investitionsausgaben für Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur werden dem Investitionsblock zugeordnet. Die Umstellung der Fahrzeugflotte hat außerdem, abhängig vom jeweiligen Szenario, unterschiedliche Auswirkungen auf die Fremdkapital (FK) Zinsaufwendungen.

3.3.2 Prämissen

3.3.2.1 Investitionen

Fahrzeuge

Die Anschaffungspreise von Batteriebussen liegen aktuell um einen Faktor > 2 über denen eines vergleichbaren Dieselbusses. Aus den Daten der KVG gehen aktuelle Anschaffungskosten für konventionelle Dieselbusse als Solo-Fahrzeug in Höhe von etwa 250 T€ und für Gelenkfahrzeuge mit gleichem Antrieb von knapp 325 T€ hervor. Die Anschaffungskosten für Batteriebusse können aus anderen ähnlich gelagerten eebc-Machbarkeitsstudien entnommen werden und sind an den aktuellen Marktpreisen¹⁰ ausgerichtet.

Der Preis für einen Solo-Batteriebus liegt derzeit bei etwa 575 T€ und für einen Batterie-Gelenkbus bei etwa 760 T€. Diese Investitionsmehrkosten können gegebenenfalls durch Förderprogramme reduziert werden.

Die derzeitigen Anschaffungspreise sind vor dem Hintergrund eines noch jungen Marktes zu sehen. Die Nachfrage nach Batteriebussen ist in den letzten Jahren exponentiell gewachsen und wird angesichts der vorherrschenden Prognosen auch in den kommenden Jahren weiter ansteigen. Die aktuell beobachtbare Preissteigerung von ca. 2 % p.a. wird bis 2029 angesetzt. Die allgemeine Wirtschaftslage, der Anstieg der Energiekosten und aktuelle Entwicklungen auf dem Rohstoffmarkt führen aktuell zu einer Preissteigerung.

Für die Busersteller kann die Nachfrageentwicklung eine deutliche Kostendegression bei steigenden Produktionsmengen und zunehmender Standardisierung bedeuten, was im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsanalyse angenommen wird. Um diesen Umstand abzubilden, wird perspektivisch ein Kostenabfall um -15 % p.a. für die Jahre 2029 bis 2031 unterstellt. Ab 2032 wird wieder die Teuerungsrate von 2 % aufgegriffen und fortgesetzt.

Zur Ermittlung der jeweiligen Abschreibungen der Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur wurde eine Abschreibungsdauer von zehn Jahren im Vorfeld abgestimmt. Aufgrund des gewählten Umstellungskonzeptes mit Schnellladeinfrastruktur an ausgewählten Wendestellen liegt kein Fahrzeugmehrbedarf vor.

Die Anschaffungszeitpunkte sind entsprechend des Beschaffungsplans angesetzt:

<i>Fahrzeugtyp</i>	<i>2023</i>	<i>2024</i>	<i>2025</i>	<i>2026</i>	<i>2027</i>	<i>2028</i>	<i>2029</i>	<i>2030</i>
Anzahl SL	4	---	---	---	5	13	---	12
Anzahl GL	8	---	11	---	3	10	---	18

Tab. 22: Übersicht KVG Beschaffungsplan 2023-2030

¹⁰ Kostenwerte entsprechen ersten den Ergebnissen der Begleitforschung zu dem laufenden Förderprogramm des BMUV bzw. BMWK

Ladeinfrastruktur¹¹

Neben den Anschaffungskosten für die Ladeinfrastruktur selbst werden auch die Investitionsausgaben für die umgebende Technik (MS/NS Transformatoren, Kabel- und Leitungen, etc.) sowie die Installations- und Tiefbaumaßnahmen pro Ladepunkt (LP) hier angesiedelt.

Im Betriebshof wird ein Ladepunkt pro Fahrzeug berücksichtigt. Grundlage ist ein sogenanntes Matrix-Ladesystem, dessen Kosten für eine Gruppe von acht Fahrzeugen homogen auf einen Wert pro Ladepunkt umgelegt wird. Im Zeitverlauf wird eine Dynamisierung der Kosten von 2 % p.a. unterstellt. Die Installation der Schnelllader erfolgt konzeptgemäß in zwei Ausbaustufen in 2025 und in 2028. Auch hier wird eine 2 %-ige Preissteigerung pro Jahr unterstellt.

Auch für die Ladeinfrastruktur wurde eine Abschreibungsdauer von 10 Jahren im Vorfeld abgestimmt.

Hinweis

Angesetzt werden Standardwerte für Installations- und Baumaßnahmen. Das Kostengefüge ist jedoch stark abhängig von den lokalen Begebenheiten und kann deutlichen Abweichungen unterliegen.

Fremdkapital Zinsaufwand

Alle für Investitionen bestimmten Finanzierungen werden als Fremdkapital betrachtet. Daraus ergeben sich FK-Zinsaufwendungen, die unter den folgenden Annahmen berechnet werden:

- Jährlicher Zinssatz: 4 %
- Disagio¹²: 0 %
- Kreditlaufzeit: 10 Jahre

3.3.2.2 Kostenstellen

Treibstoff

Um die Treibstoffkosten pro Fahrzeug zu berechnen, ist neben den Treibstoffkosten pro Bezugseinheit (Liter Diesel oder kWh elektrische Energie) auch die Verbrauchsmenge pro Fahrzeug erforderlich. Da diese Werte nicht fahrzeugscharf vorliegen können, erfolgt die Berechnung anhand der Jahresfahrleistung. Separat pro Fahrzeugtyp wird die Jahresfahrleistung auf die Fahrzeugmenge umgelegt, um die durchschnittliche Fahrleistung pro Bus zu berechnen.

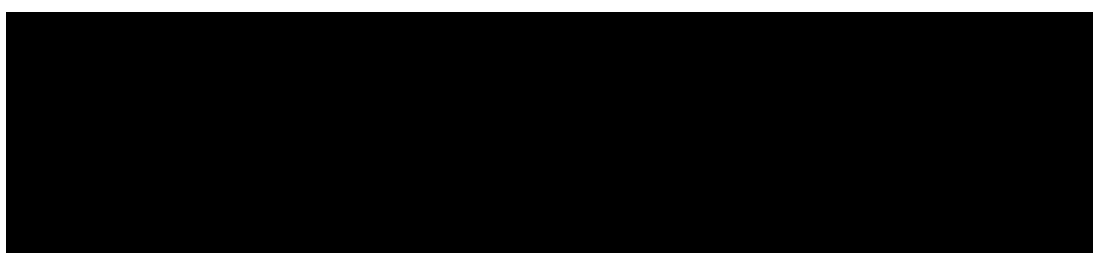
Über die Fahrleistung wird über mittlere Verbrauchswerte eine Treibstoffmenge pro Fahrzeug berechnet, wobei Treibstoff bei elektrischen Fahrzeugen elektrische Energie darstellt. Für Dieselfahrzeuge erfolgt eine weitere Differenzierung über verschiedene Verbrauchswerte in Abhängigkeit vom Fahrzeugalter. Angesetzt werden:

¹¹ Da ein rein elektrisches Modell verfolgt wird, ist Betankungsinfrastruktur hier nicht relevant

¹² Abschlussgebühr

- Dieserverbrauch Solobus: 43 l/100km (< 7 Jahre) bzw. 44 l/100km (≥ 7 Jahre)
- Dieserverbrauch Gelenkbus: 50 l/100km (< 7 Jahre) bzw. 59 l/100km (≥ 7 Jahre)
- Stromverbrauch Solobus: 1,61 kWh/km
- Stromverbrauch Gelenkbus: 2,60 kWh/km

Die Kosten für Diesel und Strom werden mit marktüblichen Dynamisierungsraten belegt. Veröffentlichungen renommierter Wirtschaftsprüfungsgesellschaften gehen hier von Steigerungen in Höhe von 1,5 % p.a. für Strom und 2 % p.a. für Dieselkraftstoff aus. Diese Werte werden auch hier angesetzt. Für Dieselkraftstoff wird hierbei auch die Entwicklung der CO₂ Steuer in die Rechnung aufgenommen. In der folgenden Tabelle ist ein Auszug der angesetzten Kostensätze dargestellt.

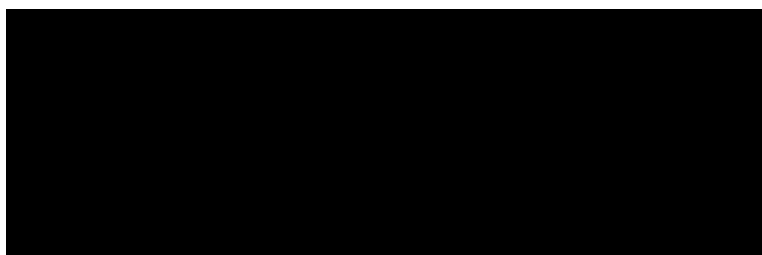


Tab. 23: Auszug der fortgeschriebenen Preise (netto) für Fahrstrom und Diesel

Wartung & Instandhaltung

Aus der Praxis ist bekannt, dass die Wartungs- und Instandhaltungskosten für Elektrobusse im Vergleich zu Dieselnissen geringfügig niedriger ausfallen. Grund hierfür ist der geringere Umfang mechanischer Verschleißteile sowie geringere Belastungen des Bremssystems, da Batteriebusse auch über den Antriebsstrang verzögert werden können (Rekuperation). Hier wird ein um 5 % geringerer Instandhaltungskostensatz für BEV gegenüber Dieselnissen angesetzt.

In der Die folgende Tabelle enthält Werte über die Instandhaltungskosten, die aus durch die KVG bereitgestellten Daten für das Geschäftsjahr 2022 abgeleitet wurden.



Tab. 24: KVG-Kassel wirtschaftliche Daten der Werkstatt 2022

Batterietausch

Auch wenn für aktuelle Batteriegenerationen noch keine Praxiswerte vorliegen, ist es unstrittig, dass die Traktionsbatterie nach einer gewissen Laufleistung ausgetauscht werden muss, um Alterungseffekten entgegenzuwirken. Hersteller gehen hier vielfach von einem Tausch nach fünf bis sieben Jahren aus, wobei diese Werte abhängig vom Anforderungsprofil starken Schwankungen unterliegen. Für die Untersuchung wird ein Tauschintervall von sieben Jahren angenommen.

Im Gegensatz zu vielen anderen Kostenfaktoren wird hier eine merkliche Preissenkung erwartet, so dass der aktuelle Kostenwert für einen Batterietausch (100.000 €) mit einer negativen Dynamisierung von - 3 % p.a. kalkuliert wird.

Fahrpersonalkosten

Auch wenn die Umlaufanpassung nur in sehr geringem Maß erfolgt, wird hier dennoch ein zusätzlicher Personalaufwand für die anfallenden Transferfahrten berücksichtigt. Der Aufwand wird mit 0,5 Vollzeitäquivalenten angesetzt, wobei anzunehmen ist, dass dieser Wert tendenziell hoch ist. Personalaufwendungen werden mit einer Teuerungsrate von 3,5 % p.a. fortgeschrieben. Grund hierfür ist der aktuelle Fach- und Arbeitskräftemangel. Es ist anzunehmen, dass die Dynamisierungsrate der Personalkosten nicht unterhalb der Inflationsrate von 3,5 % liegen wird, weshalb hier derselbe Wert angesetzt wird.

Abschreibungen

Die Abschreibung der geplanten Elektrobusse und der Ladeinfrastruktur wurde bereits in Kapitel 3.3.2.1 *Investitionen* erläutert. Für Fahrzeuge und Infrastruktur wird entsprechend der aktuellen KVG Geschäftspraxis eine Abschreibungsdauer von 10 Jahren angesetzt.

3.3.2.3 Berücksichtigung von Fördermöglichkeiten

Bekannterweise liegen die Kosten eines emissionsfreien Busses deutlich über denen eines Dieselmotors. Neben den erhöhten Fahrzeugkosten geht dies auch auf die Aufwendungen für Infrastruktur, Werkstattausstattung und sonstige betriebliche Einrichtungen zurück. Schließlich kann auf keine bestehende Infrastruktur für alternative Antriebe zurückgegriffen werden.

Aktuell wird der Markthochlauf im ÖPNV durch Förderprogramme von Bund und Ländern intensiv unterstützt. Da es aktuell nicht absehbar ist, in welchem Maß und wie lange Förderoptionen verfügbar sind, werden zwei Fördermodelle in der kommerziellen Bewertung parallel verglichen:

- S1: Elektrifizierung der Gesamtflotte ohne Fördermittel
- S2: Elektrifizierung der Gesamtflotte mit Förderung unter den folgenden Konditionen
 - o Fahrzeugkosten
Förderung von 40 % der Mehrkosten gegenüber einem vergleichbaren Dieselmotor
 - o Infrastrukturkosten
Förderung von 40 % der Gesamtkosten
 - o Laufzeit
Förderung nach obenstehenden Quoten bis inklusive 2026. Beschaffungen ab 2027 werden nicht gefördert.

3.3.3 Kommerzielle Analyse

3.3.3.1 Kostenvergleich

Einleitend werden die auf Basis der Methodik und Prämissen resultierenden Gesamtkosten pro Jahr verglichen. Dabei werden drei Szenarien einander gegenübergestellt:

- RS (Referenzszenario)
In diesem Referenzszenario „100 % Dieselbus“ wird eine Fortsetzung des aktuellen Dieselbusbetriebs unterstellt.
- S1 (Szenario 1)
Im ersten Kostenmodell für eine Flottendekarbonisierung nach ausgewählter Vorzugstechnologie erfolgt eine Betrachtung ohne jegliche Fördermittel.
- S2 (Szenario 2)
Szenario S2 entspricht technisch Szenario S1. Hier wird jedoch bis 2026 die Verfügbarkeit von Fördermitteln entsprechend der angegebenen Konditionen unterstellt.

In der folgenden Grafik sind die jährlichen Kosten aller drei Szenarien über einer Zeitachse bis 2030 aufgezeichnet, wobei Investitionskosten entsprechend der beschriebenen Prämissen als Abschreibungskosten berücksichtigt sind.

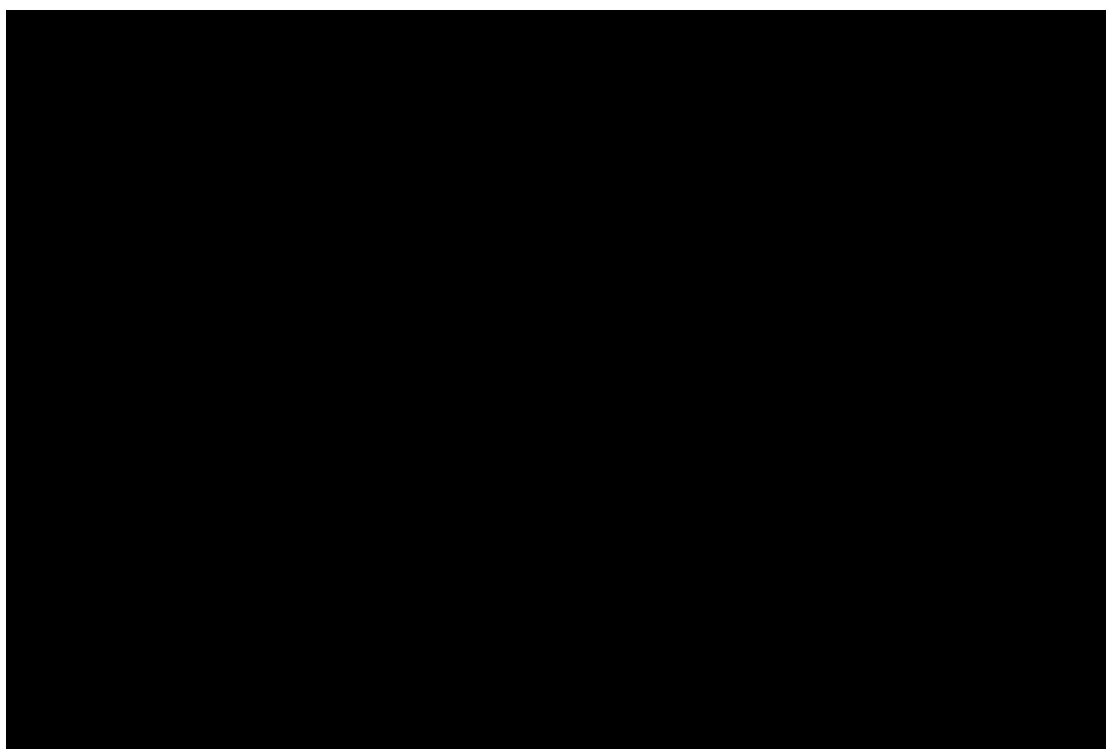


Abb. 66: Jährliche Kostenentwicklung der verglichenen Szenarien

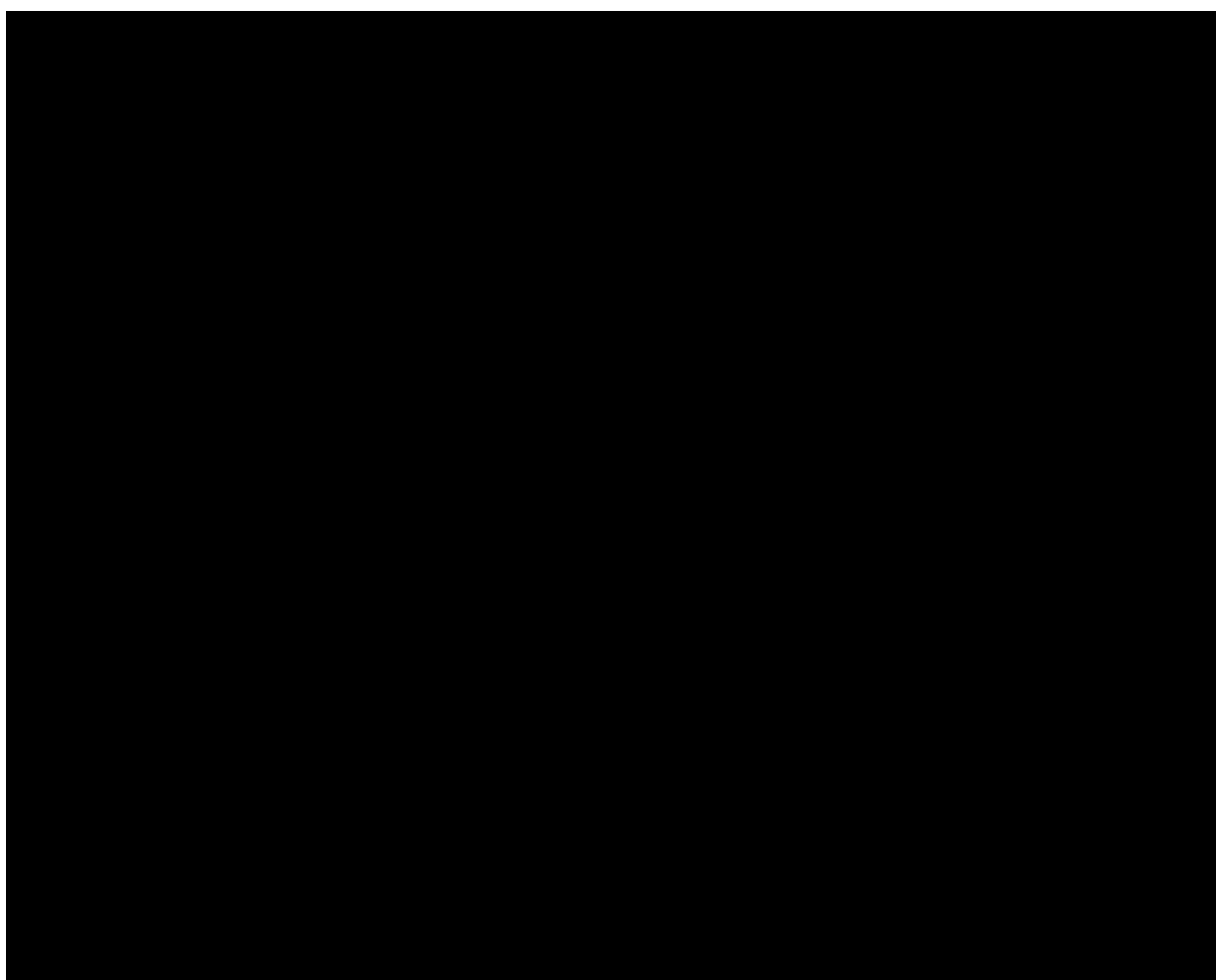
In den Jahren 2023 bis 2027 ist zunächst nur ein leichter Anstieg der Kosten zu verzeichnen. Treibend sind hier insbesondere die steigenden Personalkosten entsprechend der Dynamisierung. Die Beschaffungen im Jahr 2025 (11 x GL) und 2027 (5 x SL & 3 x GL) fallen hier zunächst nicht

übermäßig stark ins Gewicht, da die jährlichen Auswirkungen über die Abschreibungsdauer gedämpft werden.

In den Jahren 2028 und 2029 steigen die Abschreibungskosten in größeren Maß, was auch im Verlauf des Diagramms gut erkennbar ist. Grund hierfür sind zwei große Beschaffungsrunden, die trotz Abschreibungsdauer in den jährlichen Kosten merklich zu verzeichnen sind. In 2028 werden 13 x SL und 10 x GL Fahrzeuge beschafft. Im Jahr 2030 wird mit der Beschaffung von 12 Solobussen und 18 Gelenkbussen die Flottendekarbonisierung erreicht. Da allein im Jahr 2028 mehr Fahrzeuge beschafft werden, als im Intervall 2024 bis 2027, ist der Kostensprung deutlich zu sehen. Zusätzlich wirken sich die Kosten für den Batterietausch ab 2030 aus, die in diesem Jahr für die ersten Elektrobusse als notwendig abgeschätzt werden.

Die Szenarien S1 und S2 unterscheiden sich ausschließlich hinsichtlich der Kosten für die Abschreibungen (Fahrzeuge und Infrastruktur). Grund hierfür ist, dass beide Varianten technisch identisch sind und die Fördermittel sich nur auf die Investitionskosten auswirken. Auch wenn im geförderten Szenario S2 ab dem Jahr 2027 unterstellt wird, dass keine Fördermittel verfügbar sind, hält die Differenz zwischen den Szenarien über diesen Zeitpunkt hinaus an. Aufgrund der Abschreibungsdauer wird der Effekt verschleppt und erst entfallen, wenn die Abschreibungsdauer der letzten geförderten Beschaffung (2025 bis 2035) ausgelaufen ist.

Die Werte des Diagramms sind in der folgenden Tabelle als Zahlenwerte zusammengetragen:



Tab. 25: Jährliche Kostenentwicklung der verglichenen Szenarien

Bezogen auf das Jahr 2030 ergeben sich für die verschiedenen Szenarien die folgenden Gesamtkosten:

- Referenzszenario (Dieselbus): 135,4 Mio. €
- Szenario 1 (ohne Förderung): 149,5 Mio. €
- Szenario 2 (mit Förderung): 145,7 Mio. €

3.3.3.2 *Kostenleiter 2025: Vergleich Referenzszenario und BEV mit Förderung*

An dieser Stelle werden die Mehr- und Minderkosten im Jahr 2025 anhand einer Kostenleiter betrachtet. Dies erfolgt pro Kostenstelle für das Referenzszenario RS im Vergleich zum geförderten BEV Szenario S2. In Summe ergeben sich rechnerisch Mehrkosten von 638 T€ im BEV Modell S2 gegenüber dem Referenzwert.

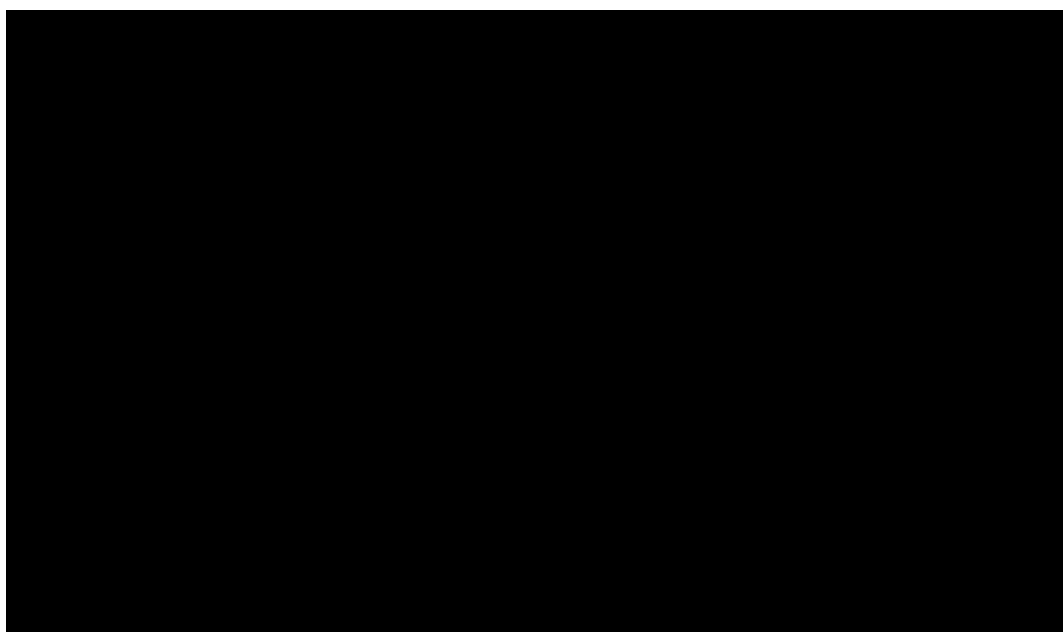


Abb. 67: Kostenleiter RS-S2 (mit Förderung) im Jahr 2025

Aufgrund der Beschaffungen in 2023 und 2025 entstehen zunächst Mehrkosten von 831 T€. Durch Einsparungen in den Kostenstellen Instandhaltung (Vgl. Kapitel 3.3.2.2 *Kostenstellen*) und Energiekosten können die Mehrkosten um ca. 192 T€ auf die verbleibende Differenz von 638 T€ reduziert werden.

Die Kostenstelle Fahrdienst wirkt sich hier nicht auf den Kostenvergleich aus, da im BEV-Szenario 2025 keine Umlaufanpassung erforderlich ist. Entsprechend besteht kein Personalmehrbedarf.

3.3.3.3 *Kostenleiter 2028: Vergleich Referenzszenario und BEV ohne Förderung*

Entsprechend dem vorherigen Kapitel wird auch hier die Kostenleiter des Jahres 2028 betrachtet. In diesem Beispiel wird das Szenario S1, BEV ohne Förderung, der Dieselvariante

gegenübergestellt. Auch wenn die Szenarien S1 und S2 gleichermaßen unterstellen, dass im Jahr 2028 keine Förderungen verfügbar sind, ist Szenario S1 hier geprägt durch die vorherigen Beschaffungen. Während in Szenario S2 – nach Förderung – nur ein Teil der Investitionsmehrkosten vor 2026 abgeschrieben wird, ist es in diesem Szenario die volle Summe.

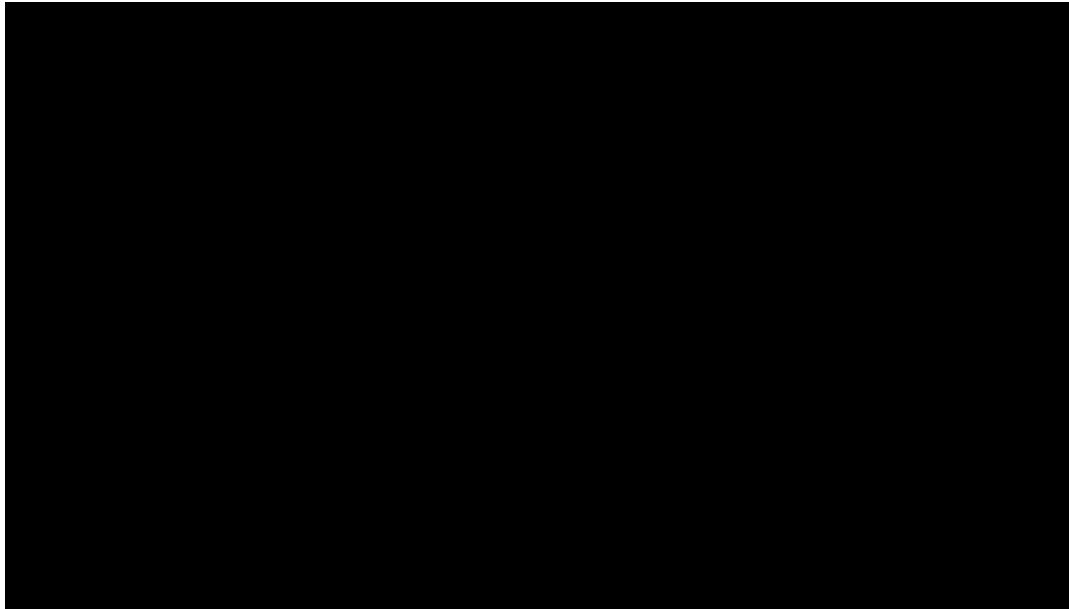
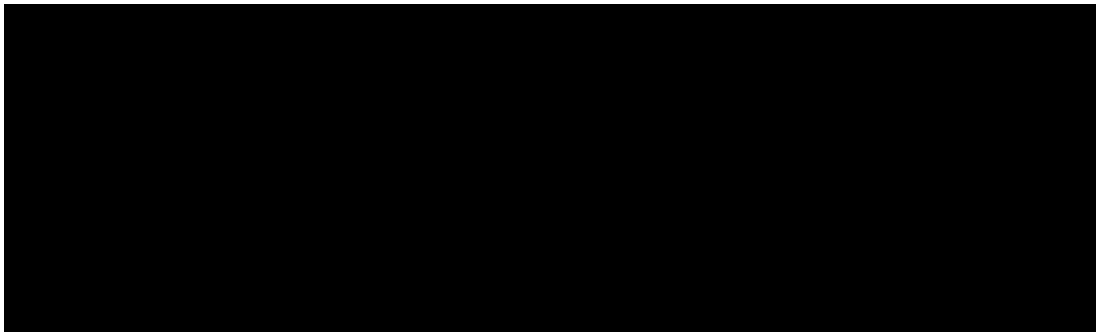


Abb. 68: Kostenleiter RS-S1 (ohne Förderung) im Jahr 2028



3.3.3.4 Jährliche Entwicklung der kumulierten Kosten

Die beste Vergleichsmöglichkeit über die zu erwartenden Gesamtkosten bietet die kumulierte Kostenbetrachtung. Hierbei werden nur die Systemkosten ab dem Jahr 2023 betrachtet, wenn die Flottenelektrifizierung eingeleitet wird.

Auf den ersten Blick ist ersichtlich, dass die Gesamtkosten in einem relativ engen Korridor verlaufen. Im Jahr 2034 liegen die kumulierten Kosten des Referenzszenarios bei etwa 215 Mio. Euro, während das kostenintensivste Szenario S1 (BEV ohne jegliche Förderung) bei etwa 241 Mio. Euro liegt. Die Differenz liegt bei 26,8 Mio. Euro, was ca. 12 % entspricht.

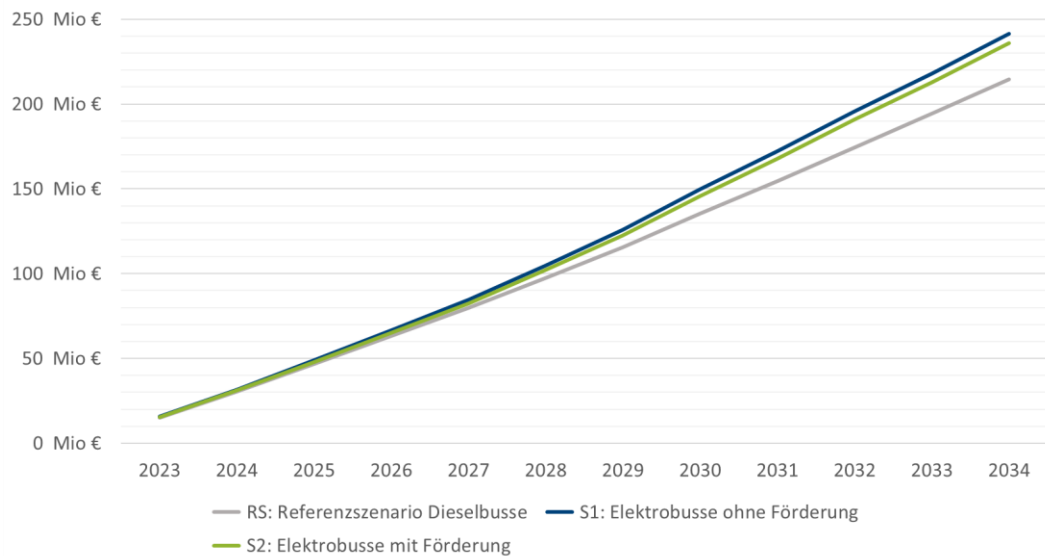


Abb. 69: Kumulierte Kosten der verglichenen Szenarien

Die Ursache für den engen Wertekorridor ist die Tatsache, dass die technologiebedingten Mehrkosten nur einen Anteil der Gesamtkosten ausmachen. Wesentliche Kostentreiber, wie beispielsweise die Personalkosten, haben einen wesentlich stärkeren Einfluss auf den Kostenverlauf.

Zu Beginn der Betrachtung liegen die Kurven nahezu aufeinander. Grund hierfür sind die sukzessiven Beschaffungen. Zunächst werden BEV in kleinen Stückzahlen beschafft. Die Differenzkosten werden durch die Abschreibung umgelegt und lösen zunächst nur einen sehr kleinen Kostenunterschied auf, der aufgrund der Auflösung in der Grafik nahezu nicht erkennbar ist.

Im Zuge des Flottenausbaus steigt die Anzahl der Beschaffungen. Wie in den Kapiteln 3.3.3.2 und 3.3.3.3 über die Kostenleitern dargestellt wurde, liegen im BEV-System jedes Jahr Mehrkosten vor, obwohl Einsparungen in Instandhaltung und Energieverbrauch dem Verlauf entgegenwirken. Mit jeder Beschaffung läuft die Kostenschere weiter auseinander, so dass ab etwa 2026 ein Auseinanderdriften der Kostenverläufe auch optisch erkennbar wird. Ab dem Jahr 2028 wächst der Abstand zwischen dem Referenzszenario und den BEV-Modellen erkennbar an. Grund hierfür sind die großen Beschaffungsrunden 2028 und 2030, deren Mehrkosten hier deutlichen Einfluss auf den Kurvenverlauf nehmen.

Im Szenario S2 (BEV mit Förderung) bewirken die Fördermittel, dass der Graph anfänglich nah am Referenzszenario verläuft. Ab dem Jahr 2027 entfallen auch hier die Fördermittel, so dass die Mehrkosten der Beschaffungen sich stärker auf den Kurvenverlauf ausprägen. Aufgrund der Abschreibung streckt sich die Auswirkung über die Abschreibungsdauer. Der grüne Graph entfernt sich von dem grauen Graph und pendelt sich langsam in einen Verlauf ein, der parallel zum blauen Graph verläuft.

Wenn nun die Brücke zur Betrachtung der Umweltkosten geschlagen wird (Vgl. Kapitel 3.1.3 *Umweltkosten*), kann die Kostenabweichung relativiert werden. Dabei ist zu beachten, dass es sich bei den Umweltkosten um gesamtgesellschaftliche Kostenwerte handelt, die nicht (direkt) durch die KVG getragen werden. Im Jahr 2030 liegt bereits ein kumuliertes Einsparpotenzial von

4,9 Mio. € für die Umweltkosten vor. Da hier die Flotte voll elektrifiziert ist, kommt ab dem Jahr 2031 ein jährliches Einsparpotenzial von mindestens 1,4 Mio. € hinzu.

3.3.4 Investitionsübersicht 2023 - 2030 pro Jahr

In den vorangegangenen Kapiteln fließen die Investitionsgüter als Teil der Abschreibungskosten ein und sind entsprechend nicht direkt erkennbar. Um hier einen besseren Überblick bis zur Flottendekarbonisierung zu gewährleisten, sind die Investitionskosten hier in Jahresscheiben dargestellt.

Analog zu den vorherigen Kapiteln werden auch hier die bekannten drei Szenarien miteinander verglichen. Dargestellt sind hier nur die wesentlichen Investitionskosten in Ladeinfrastruktur und Fahrzeuge. Zusatzkosten, wie z.B. Werkstattanpassungen, sind hier vernachlässigt. Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, sind hier kurz die Beschaffungszahlen im betrachteten Intervall wiederholt.

<i>Fahrzeugtyp</i>	<i>2023</i>	<i>2024</i>	<i>2025</i>	<i>2026</i>	<i>2027</i>	<i>2028</i>	<i>2029</i>	<i>2030</i>
Anzahl SL	4	---	---	---	5	13	---	12
Anzahl GL	8	---	11	---	3	10	---	18

Tab. 26: Übersicht KVG Beschaffungsplan 2023-2030

Wie der Grafik zu entnehmen ist, werden die Investitionskosten immer vollständig dem Beschaffungsjahr zugeordnet. Sofern Beschaffungen früh im Jahr erfolgen, kann die Investition in Ladeinfrastruktur im Vorjahr erforderlich sein, um diese rechtzeitig verfügbar zu machen.

Es ist ersichtlich, dass die Kosten für die BEV Modelle S1 und S2 über dem Dieselreferenzwert liegen. Da hier keine Infrastruktur aufgebaut werden muss und die Fahrzeugkosten bei weniger als der Hälfte von BEV-Varianten liegen, ist eine entsprechende Struktur nicht überraschend.

Ab dem Jahr 2027 sind die Investitionskosten für die beiden BEV-Szenarien S1 und S2 identisch. Grund hierfür ist der Wegfall von Förderprogrammen, der auch im geförderten Szenario S2 ab 2027 unterstellt wird. In den Beschaffungen 2023 sowie 2025 sind die Auswirkungen der Subventionen deutlich erkennbar. Während im Szenario S1 die vollen Mehrkosten berücksichtigt sind, müssen im Szenario S2 60 % der Fahrzeugmehrkosten und 60 % der Infrastrukturkosten als Investition erbracht werden. Die Kostendifferenz wird durch Förderprogramme gedeckt.

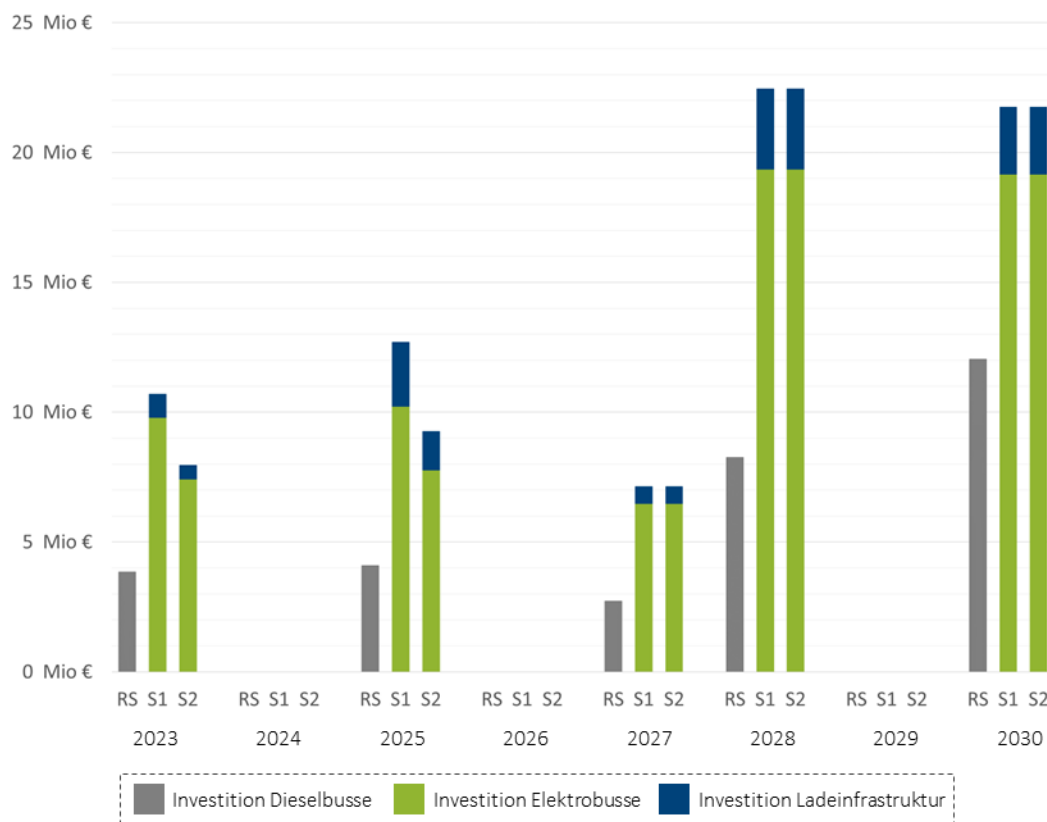


Abb. 70: Jährliche Investitionsübersicht

Aus der Investitionsübersicht ist ersichtlich, dass der Großteil der Investitionen auf die Jahre 2028 und 2029 fällt. Angesichts der Beschaffung von 53 Fahrzeugen in diesem Zeitraum ist dies nachvollziehbar. Im Modell wird unterstellt, dass diese Beschaffungen ohne Subventionen erfolgen müssen.

Der Vollständigkeit halber sind die angesetzten Investitionskosten hier auch tabellarisch dargestellt.

Szenario	Position	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
RS	Investition Fahrzeuge	3.847 T€	--	4.093 T€	--	2.729 T€	8.250 T€	--	12.033 T€
	Investition LIS	--	--	--	--	--	--	--	--
S1	Investition Fahrzeuge	9.796 T€	--	10.231 T€	--	6.481 T€	19.358 T€	--	19.164 T€
	Investition LIS	900 T€	--	2.465 T€	--	649 T€	3.092 T€	--	2.585 T€
S2	Investition Fahrzeuge	7.417 T€	--	7.776 T€	--	6.481 T€	19.358 T€	--	19.164 T€
	Investition LIS	540 T€	--	1.479 T€	--	649 T€	3.092 T€	--	2.585 T€

Tab. 27: Jährliche Investitionsübersicht

Bezogen auf das Jahr 2030 ergeben sich für die verschiedenen Szenarien in Summe die folgenden Investitionskosten:

- Referenzszenario (Dieselbus): 31,0 Mio. €
- Szenario 1 (ohne Förderung): 74,7 Mio. €
- Szenario 2 (mit Förderung): 68,5 Mio. €

4 Fazit

4.1 Technisches Fazit

Vor dem Hintergrund einer vollständigen Dekarbonisierung der KVG-Flotte bis zum Jahr 2030 stehen grundsätzlich zwei Technologiealternativen zur Verfügung: Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV) und batterieelektrische Fahrzeuge (BEV). Auf einer rein technischen Basis sind beide Alternativen geeignet, da in beiden Fällen Szenarien entwickelt werden können, aus denen eine Machbarkeit aller Umläufe bis zum Jahr 2030 resultiert.

Im direkten Vergleich fällt die Auswahl deutlich zugunsten BEV aus. Maßgeblich sind hier insbesondere die Gesamtkosten bzw. der Aufwand für die Realisierung. Selbst unter sehr optimistischen Annahmen für den Wasserstoffbezug sind die Kosten deutlich erhöht. In diversen Expertenrunden und Publikationen wird dieses Resultat auch auf allgemeiner Ebene erzielt. Aufgrund der verlängerten Prozesskette (Strom $\Rightarrow$ Wasserstoff $\Rightarrow$ Strom) sind Mehraufwendungen physikalisch bedingt. Gleichzeitig wird die Nachfrage nach Wasserstoff auf absehbare Zeit stark ansteigen, wenn große Industriezweige auf diesen Energieträger angewiesen sind. Die Verfügbarkeit von günstigem Wasserstoff weit unterhalb der antizipierten Marktpreise kann also angezweifelt werden. Die gilt im verschärften Umfang auch für Folgeprodukte wie E-Fuels, die auf Wasserstoffbasis gewonnen werden.

Gleichzeitig liegen keine Sondersituationen vor, die den Einsatz von H₂ beziehungsweise die damit verbundenen Sonderaufwand rechtfertigen. Aufgrund der konstanten Linienwege im ÖPNV ist dies auch der Standardfall. Nach Auffassung von eebc können extrem gewichtsabhängige Einsatzgebiete (z.B. Luftverkehr) oder ortsflexible Anwendungen (z.B. internationaler Gütertransport) ohne feste Linienwege mit der Möglichkeit der Installation strategischer Ladeinfrastruktur Einsatzgebiete darstellen, die erhöhte Betriebskosten rechtfertigen.

Im Feld der BEV können verschiedene Optimierungsansätze verfolgt werden, um der begrenzten Reichweite batterieelektrischer Fahrzeuge entgegenzuwirken. Einerseits kann das Anforderungsprofil optimiert werden, indem die notwendige Reichweite durch kürzere Umläufe reduziert wird. In diesem Fall müssen Umläufe angepasst werden, was zu einer erhöhten Menge Transferfahrten führt, die wiederum zusätzliche Personalkosten auslösen. Andererseits besteht die Option, durch Schnellladestationen an Wendestellen Energie während des Betriebsablaufs zuzuführen und damit die effektive Reichweite zu verlängern. In diesem Fall kann die notwendige Umlaufanpassung und damit auch der resultierende zusätzliche Personalbedarf auf ein absolutes Minimum reduziert werden.

Beide Optimierungsstrategien sind einem Detailvergleich unterzogen worden. Ausschlaggebend sind auch hier die resultierenden Gesamtkosten. Im Rahmen der Berechnungsgenauigkeit sind beide Alternativen auf Augenhöhe. Im Modell mit ausschließlicher Depotladung stehen geringe Mengen erforderlicher Zusatzfahrzeuge den erforderlichen Schnellladestationen aus dem Alternativansatz gegenüber. Da Personalkosten erst nach Ausführung der Umlaufanpassung explizit kalkuliert werden können, muss die Auswirkung abgeschätzt werden. Da im Szenario mit Zwischenladen nur eine sehr geringe Anzahl Umläufe angepasst werden muss, wird hier von einem deutlich geringeren Personalmehrbedarf ausgegangen. Dennoch wurde eine neutrale Empfehlung für beide BEV-Varianten ausgesprochen.

Die Auswahl einer Vorzugstechnologie fällt auf den Ansatz mit Zwischenladen, was insbesondere auf die folgenden Gründe zurückgeführt wird.

- Die Umlaufanpassung für BEV mit Zwischenladung kann im geringeren Umfang erfolgen und zieht insbesondere weniger Personalaufwand nach sich. Auch wenn zusätzliche Arbeitsstunden für Transferstrecken anfallen, ist anzunehmen, dass kein zusätzliches Personal eingestellt werden muss.
- Die Depotladeinfrastruktur wird mit Hinblick auf die technische Entwicklung nicht zu klein dimensioniert, um langfristig (Horizont ab 2040) bei Bedarf auf eine reine Depotladung umsteigen zu können. Dennoch wirkt sich die teilweise Energiezuführung im Liniennetz positiv auf die erforderliche Anschlusskapazität im Depot aus.
- Die eingeleitete Beschaffung für das MEKS-Projekt entspricht der gewählten Vorzugstechnologie. Die Gesamtflotte basiert auf einem einzigen Fahrzeugtyp, was Vorteile bei der Fahrzeugdisposition, Wartung und Instandhaltung bedeuten kann.
- Die Bedienung der Ladeschnittstelle (Pantograph) erfolgt automatisch. Die Nachladung erfolgt auch im Depot per Pantograph bei reduzierter Ladeleistung. Einerseits sinkt damit die Anforderung an das Fahrpersonal und andererseits wird der Faktor Mensch als mögliche Fehlerquelle ausgeschlossen.

Den Pro-Argumenten stehen zwei Contra-Argumente entgegen.

- Der Aufbau von Infrastruktur außerhalb des Depots bedeutet einen zusätzlichen planerischen und baulichen Aufwand. Insbesondere im städtischen Bereich kann die Installation aufwendig sein. Aufgrund der Erfahrungen im MEKS-Projekt schätzt die KVG diesen Faktor jedoch als beherrschbar ein.
- Langfristig wird eine weitere technische Entwicklung der Batterietechnik erwartet. Es ist anzunehmen, dass aufgrund steigender Kapazitäten in den nächsten Dekaden eine wesentlich größere Anzahl Umläufe ohne Zwischenladen machbar ist. Es ist zu befürchten, dass die Technik der Zwischenladung langfristig obsolet wird. Dennoch ist über eine realistische Lebensdauer der Ladeinfrastruktur (20 bis 25 Jahre) anzunehmen, dass die Technik ihre Daseinsberechtigung aufweist. Es wird als realistisch angenommen, dass in folgenden Fahrzeuggenerationen auch Modelle mit kleinerer Batteriekapazität (Vergleichbar mit aktuellen Werten) und Pantograph angeboten werden. Diese würden eine höhere Passagierkapazität ermöglichen und vermutlich zu attraktiven Preisen verfügbar sein.

4.2 Kommerzielles Fazit

Die kommerzielle Analyse bestätigt grundsätzlich die vorherrschende Auffassung, dass alternative Antriebe derzeit kostentechnisch nicht konkurrenzfähig zum Dieselbus sind. Bei Betrachtung der reinen Investitionen pro Geschäftsjahr wird dies besonders deutlich. Es besteht die Erwartung, dass sich langfristig die Marktpreise für alternative Antriebe gegenüber Dieselnissen deutlich verbessern.

In den Kalkulationsmodellen wird bisher eine konservative Änderung der Marktpreise unterstellt. Es besteht berechnete Hoffnung, dass in der Realität bessere Konditionen verfügbar sein werden oder zumindest weiterhin staatliche Subventionen unterstützend ansetzen.

Trotz aller Mehrkosten kann auch beobachtet werden, dass die kumulierten Gesamtkosten im Wesentlichen von anderen Faktoren, wie beispielsweise den Personalkosten, getrieben werden. Hier bewirkt der Technologiewechsel im Jahr 2030 einen Mehrkostenanteil von lediglich ca. 12 %. Zum Vergleich: Selbst im zeitweise geförderten Szenario S2 liegen die reinen Investitionskosten in Bezug auf Fahrzeuge und Infrastruktur von 2023 bis 2030 nahezu auf dem doppelten Wert der Fahrzeuginvestitionen im Diesel-Referenzszenario.

In Summe kann festgehalten werden, dass der Technologiewechsel Zusatzkosten verursacht. Jedoch steigen die Gesamtkosten nicht in einem Maß, wie es häufig angenommen wird.

Im Rückschluss auf die Auswahl einer Vorzugstechnologie kann hier jedoch angeführt werden, dass die gewählte Strategie (BEV mit Zwischenladen) auf einer sehr vergleichbaren Kostenebene zum zweiten BEV-Modell (Depotladen) rangiert. Langfristig kann die Tendenz auch stärker in Richtung BEV mit Zwischenladen ausfallen. Da hier nur eine Umlaufanpassung im geringen Maß erforderlich ist, muss weniger zusätzliches Personal eingeplant werden. Unter der Annahme, dass die Personalkosten aufgrund der Lohnentwicklung und der Personalknappheit weiterhin ansteigen, kann dieses Einsparpotenzial langfristig eine besondere Bedeutung aufweisen.

Die FCEV-Modelle sind sowohl mit grünem als auch mit türkischem Wasserstoff deutlich kostenintensiver bewertet als beide BEV-Modelle. Die Mehrkostenproblematik dieses Kapitels würde bei Einsatz dieser Technik deutlich verschärft. BEV können unter der Prämisse Emissionsfreiheit überspitzt formuliert als das „kleinere Übel“ identifiziert werden und werden hier rein aus kommerziellen Gründen deutlich empfohlen.

Die Kostenkalkulation geht auf den aktuellen Marktstand der alternativen Antriebe zurück. Bei weiterer Verbreitung der Elektromobilität ist es möglich, dass Investitionskosten für Fahrzeuge und Infrastruktur langfristig deutlich fallen. Ähnliches gilt für die Strompreisentwicklung. Im Rahmen der Untersuchung wird ein hohes Preisniveau unterstellt. Bei Ausbau erneuerbarer Energien ist eine Kostenreduktion mit positivem Einfluss auf die BEV Betriebskosten denkbar.

Die Berechnung der Umweltkosten erlaubt jedoch auch einen anderen Blick auf die Gesamtsituation. Selbstverständlich sind diese gesellschaftlichen Kosten nicht Teil der KVG-Geschäftsbilanz und damit gewissermaßen fiktiv. Dennoch repräsentieren sie verglichen mit einem Einsatz von BEV auf lange Sicht gesamtgesellschaftlich gesteigerte Aufwendungen, die erbracht werden müssen, wenn ein Dieselnbetrieb fortgesetzt würde. Bereits parallel zum Transformationsprozess wird hier ein Umweltkostenvorteil von ca. 5 Mio. Euro bis 2030 erzielt. Ab der Vollumstellung wird jedes Jahr ein weiterer Umweltkostenvorteil erzeugt, der mit ca. 1,4 Mio. Euro beginnt und jährlich weiter ansteigt. In den 2040er Jahren wird unter den gegebenen Prämissen voraussichtlich ein Break Even Point erreicht, ab dem die BEV-Modelle kostengünstiger sind, wenn der Dieselnbetrieb mit den berechneten Umweltkosten beaufschlagt wird.

4.3 Gesamtfazit

Die KVG verfolgt mit der Flottendekarbonisierung bis 2030 ein ambitioniertes Ziel. Der durch das MEKS-Projekt eingeleitete Transformationspfad stellt auch für die Gesamtflotte eine sehr gut geeignete Technikalternative dar. Die Umstellung kann auf demselben Antriebskonzept aufbauen, was insbesondere hinsichtlich Fahrzeugdisposition, Wartung und Service sowie Umlauf- und Betriebsplanung sehr attraktiv ist, da die Variantenvielfalt eingeschränkt ist.

Anpassungsmaßnahmen und daraus resultierende Mehrkosten können nicht vermieden werden. Die Zeitspanne bis 2030 ist schlichtweg zu kurz, um technische Entwicklungssprünge zu unterstellen, die die Fahrzeugreichweite im erforderlichen Maß zu erhöhen. Dies gilt jedoch auch im beschränkten Umfang für FCEV: Auch hier ist ein „Eins-zu-Eins“ Ersatz aller Dieselsebusse nicht ohne Umlaufanpassung möglich.

Dennoch kann der ambitionierte Plan auch ohne exorbitante Zusatzaufwendungen realisiert werden. Vor dem Hintergrund einer vollständigen Dekarbonisierung der Gesamtflotte mit ca. 80 Bussen erscheint der Zusatzaufwand von 5 Schnellladestationen sehr überschaubar. Ähnliche Maßnahmen sind vielfach schon bei deutlich kleineren Flotten erforderlich.

Auch wenn das Gesamtfazit sehr positiv ist, muss berücksichtigt werden, dass die Dekarbonisierung zwangsläufig Zusatzkosten bedeutet. Selbst wenn ein „Eins-zu-Eins“ Ersatz möglich wäre, würden die höheren Anschaffungskosten Mehraufwendungen gegenüber einem Dieseldieselkonzept verursachen. Unter der Prämisse der Emissionsfreiheit bis 2030 stellt die gewählte Vorzugstechnologie BEV mit Zwischenladen die wirtschaftlich und betriebstechnisch attraktivste Alternative dar.

Um den Betrieb der dekarbonisierten Fahrzeugflotte effizient abwickeln zu können, empfiehlt es sich, die IT-Systeme für die Einsatzplanung, das Lade- und Betriebshofmanagement anzupassen bzw. in dessen Ausbau zu investieren.

© 2024 eebc European Electrical Bus Company GmbH