

Machbarkeitsstudie Alternative Antriebe für das Stadtbussystem in Lindau

Abschlussbericht

Kunde: Stadtverkehr Lindau (B) GmbH
Auenstraße 12
88131 Lindau (B)



Autoren: Rogge, Matthias
Schreven, Sebastian
Preißinger, Simon

Datum: 14.02.2020

Inhalt

Inhalt	- 1 -
Studieninhalte	- 2 -
1. Grundlagenermittlung und Aufnahme der lokalen Situation (AP 1)	- 3 -
1.1 Betriebsdaten	- 3 -
1.2 Technische Grundlagen	- 6 -
1.3 Betriebshof Robert-Bosch-Straße.....	- 15 -
1.4 Potenzielle Ladeorte für Batteriebusse	- 16 -
1.5 Kostenannahmen.....	- 17 -
1.6 Besondere Herausforderungen in Lindau	- 21 -
2. Technische und betriebliche Analyse (AP 2).....	- 23 -
2.1 Methodik und Kriterien	- 23 -
2.2 Detailergebnisse	- 24 -
2.3 Ergebnisübersicht und Diskussion	- 33 -
3. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Quantifizierung der Umweltwirkungen (AP 3) ...	- 35 -
3.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	- 35 -
3.2 Umweltauswirkungen.....	- 42 -
4. Umstellungskonzept (AP 4).....	- 45 -
4.1 Methodik und Kriterien	- 45 -
4.2 Technologieempfehlung.....	- 46 -
4.3 Umstellungsphasen	- 47 -
5. Zusammenfassung und Fazit.....	- 55 -
Referenzen	- 56 -
A. Anhang	- 57 -
Umweltauswirkungen (AP 3)	- 57 -

Studieninhalte

Die vorliegende Machbarkeitsstudie „Alternative Antriebe für das Stadtbussystem in Lindau“ untersucht und bewertet das gesamte Busnetz des Stadtverkehrs Lindau hinsichtlich einer Umstellung auf alternative Antriebssysteme. Sie gliedert sich in vier Arbeitspakete, welche in Abbildung 1 dargestellt sind.

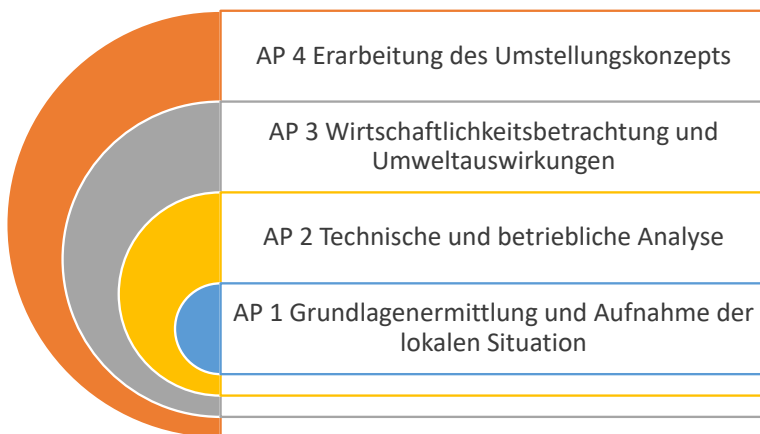


Abbildung 1: Übersicht Struktur der Studie in 4 Arbeitspaketen

Zunächst werden die konkrete betriebliche Situation erfasst und potentielle Orte für die Errichtung von Infrastruktur bewertet (AP 1). Als technologische Optionen werden Batteriebusse, Brennstoffzellenbusse sowie Gasbusse betrachtet und die technische Machbarkeit sowie die betrieblichen Konsequenzen für jede Technologie ermittelt (AP 2). Die aus einer Umstellung resultierenden finanziellen Auswirkungen und Potential der Emissionsreduktion werden anschließend dem Referenzsystem Dieselbus Euro VI gegenübergestellt (AP 3). In einer Kosten-Nutzen-Analyse werden auf dieser Basis Technologieempfehlungen abgeleitet, die in die Erarbeitung der Umstellungskonzepte einfließen (AP 4). Der vorliegende Bericht folgt diesem Aufbau.

1. Grundlagenermittlung und Aufnahme der lokalen Situation (AP 1)

Die Eignung der alternativen Antriebssysteme wird maßgeblich durch lokale Spezifika beeinflusst, beispielsweise variieren in Abhängigkeit vom Betriebsmodell und der Liniencharakteristik die zu erbringenden Fahrleistungen. Die im Rahmen der Studie erarbeitete Datengrundlage bildet die Charakteristiken des Stadtgebiets Lindau ab und dient als Basis für die weitere Betrachtung.

1.1 Betriebsdaten

Die aktuell befahrenen Linien 1, 2, 3 (inkl. 3K und 3S) und 4 des Stadtbussystems in Lindau sind in Abbildung 2 dargestellt. Derzeit werden auf den Linien 1 und 2 Midibusse eingesetzt, welche aufgrund der engen Kurvenradien im Inselkern erforderlich sind. Auf den übrigen Linien werden Solobusse eingesetzt. Eine Besonderheit des Stadtbussystems ist, dass alle Linien über einen zentralen Umsteigeplatz (ZUP) fahren. Im halbstündlichen Takt halten dort alle Fahrzeuge der vier Linien und bieten den Fahrgästen eine dreiminütige Umsteigezeit. Zudem verbleibt untertägig ein Fahrzeug am ZUP und wird im Bedarfsfall eingesetzt.



Abbildung 2: Liniennetzplan des Lindauer Stadtbussystems [1]

Seitens des Stadtverkehrs Lindau ist geplant, das Fahrleistungsangebot des Stadtbussystems zukünftig auszubauen. Die geplante Ausweitung des Fahrleistungsangebots ist nachfolgend beschrieben und wurde als Grundlage für die Studie genutzt.

Die Linie 1 soll am ZUP in zwei Linien aufgetrennt werden (Linie 1A und Linie 1B). Die Linie 1A soll zwischen *Bahnhof/Insel* und ZUP verkehren, wohingegen die Linie 1B die Fahrleistung zwischen ZUP und der Haltestelle *Oberhochsteg* übernimmt. Diese Anpassung ermöglicht, dass langfristig Solobusse auf der Linien 1B eingesetzt werden können.

Die Linie 2 soll zukünftig ebenfalls von Midi- auf Solobusse umgestellt werden. Der Einsatz von Solobussen erfordert eine geänderte Linienführung auf der Insel, bei der die Busse am Hauptbahnhof wenden und nicht mehr durch den Inselkern fahren.

Die Linie 3 wird aktuell in mehreren Varianten gefahren. Das Betriebskonzept soll dahingehend geändert werden, dass aus der Linie 3S, die zwischen ca. 14 Uhr und 18 Uhr befahren wird, die Linie 5 entsteht. Die Einsatzzeit der Linie soll dann auf 7 Uhr bis 20 Uhr erhöht werden. Die Linie 3K wird in die Linie 3 integriert und dabei um deren Fahrprofil auf 7 Uhr bis 20 Uhr erweitert. Vor 7 Uhr und nach 20 Uhr wird die Linie 3 mit dem aktuellen Linienplan gefahren. Durch die zusätzlichen Fahrten auf Linie 5 erhöht sich der Fahrzeugbedarf (ohne Reserve) des Dieselbusbetriebs um ein Fahrzeug auf 13 Busse (12 Solobusse, 1 Midibus). Tabelle 1 bietet einen Überblick über die geplanten Änderungen der Fahrleistung gegenüber dem aktuellen Betriebskonzept.

Aktuelles Betriebskonzept				Geplante Fahrplanänderungen			
Linie	Gefäßgröße	Endstelle 1	Endstelle 2	Linie	Gefäßgröße	Endstelle 1	Endstelle 2
1	Midibus	Oberhochsteg	Bahnhof/Insel	1A	Midibus	Anheggerstraße ZUP	Bahnhof/Insel
2	Midibus	Unterreitnau	Bahnhof/Insel	1B	Solobus	Anheggerstraße ZUP	Oberhochsteg
3	Solobus	Oberreitnau Nord	Grenzsiedlung/Zech	2	Solobus	Unterreitnau	Bahnhof/Insel
3K	Solobus	Anheggerstraße ZUP	Gewerbegebiet	3	Solobus	Oberreitnau Nord	Gewerbegebiet, Grenzsiedlung/Zech
3S	Solobus	Anheggerstraße ZUP	Grenzsiedlung/Zech	5	Solobus	Anheggerstraße ZUP	Grenzsiedlung/Zech
4	Solobus	Gitzenweiler Hof	Alwind	4	Solobus	Gitzenweiler Hof	Alwind

Tabelle 1: Gegenüberstellung des aktuellen Betriebskonzepts und der geplanten Ausweitungen des Linienverkehrs

Einen wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf der Elektrobusse haben neben dem Gewicht der Fahrzeuge vor allem die Geschwindigkeit der Linienfahrt und die Topographie der Strecke. Aus diesem Grund wurde für jede Linie die genaue Liniencharakteristik nachgebildet. In Abbildung 3 ist beispielhaft der Verlauf der Linie 2 dargestellt, startend von der Haltestelle

Unterreitnau, hin zu der Endstelle *Bahnhof/Insel*. Abbildung 4 zeigt das zugehörige Höhenprofil dieser Linie. Anhand der Charakteristika erfolgte in AP 2 die Energiebedarfsbestimmung für jede Linie.

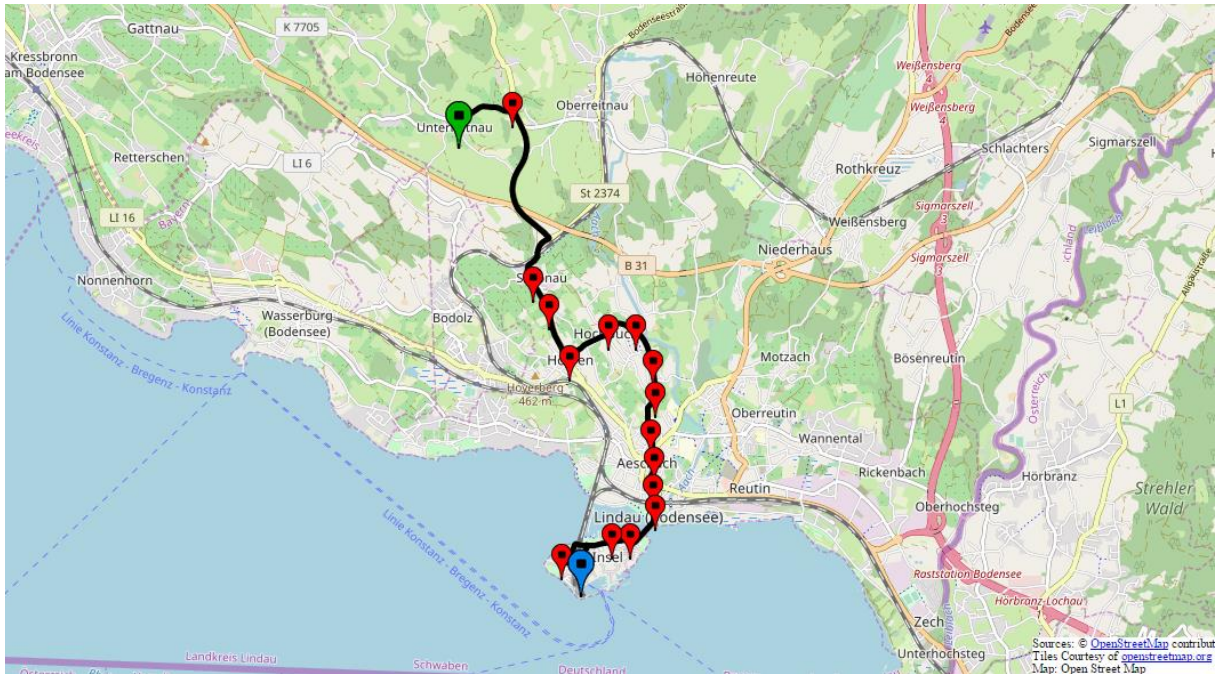


Abbildung 3: Linienvverlauf der Linie 2 (Unterreitnau Richtung Bahnhof/Insel)

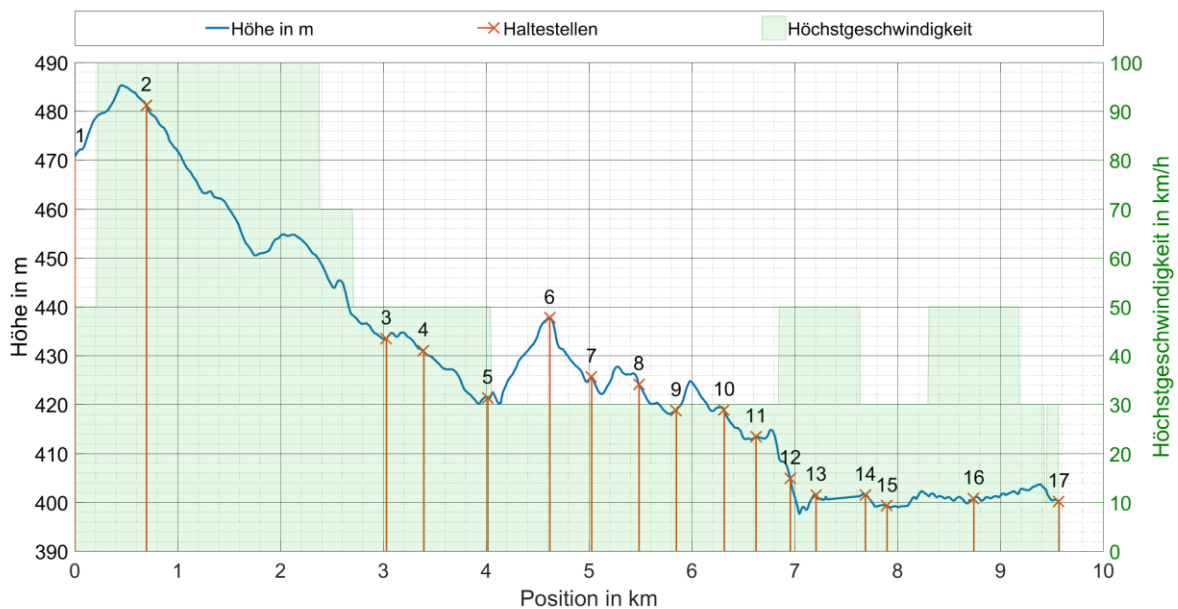


Abbildung 4: Höhenprofil der Linie 2 (Unterreitnau Richtung Bahnhof/Insel)

Der Einsatz von Batteriebussen erfordert häufig Umlaufanpassungen, da aufgrund der begrenzten Batteriekapazität die Reichweite limitiert ist. Diese Anpassungen führen zu zusätzlichen Leerfahrten, welche anhand eines Routings (Berechnung der Fahrzeit und Distanzen zwischen jeder Haltestelle und dem Betriebshof) unter Berücksichtigung der konkreten Verkehrssituation erstellt und in die Datenbasis aufgenommen wurden.

1.2 Technische Grundlagen

Die Studie umfasst die Analyse alternativer Antriebssysteme, welche einen lokal niedrigeren oder nahezu emissionsfreien Betrieb ermöglichen¹. Es werden Batteriebusse, Brennstoffzellenbusse² und Gasbusse sowie die dazugehörige Lade- bzw. Tankinfrastruktur betrachtet. Die technischen Parameter der Fahrzeuge und der Infrastruktur sind nachfolgend erläutert.

1.2.1 Fahrzeugtechnologien und -konfigurationen

In der Studie wurden unter dem Überbegriff „Elektrobusse“ sowohl Batteriebusse als auch Brennstoffzellenbusse analysiert. Die Mehrheit der Elektrobushersteller verfolgt einen modularen Ansatz, bei dem die Fahrzeuge in unterschiedlichen Ausprägungen konfiguriert werden können. Dies umfasst unterschiedliche Batterie- bzw. Brennstoffzellensystemgrößen, aber auch verschiedene Ladeleistungen und Koppelsysteme. Anhand der am Markt verfügbaren Fahrzeuge wurden Referenzbustypen hergeleitet, welche in Abbildung 5 dargestellt sind.

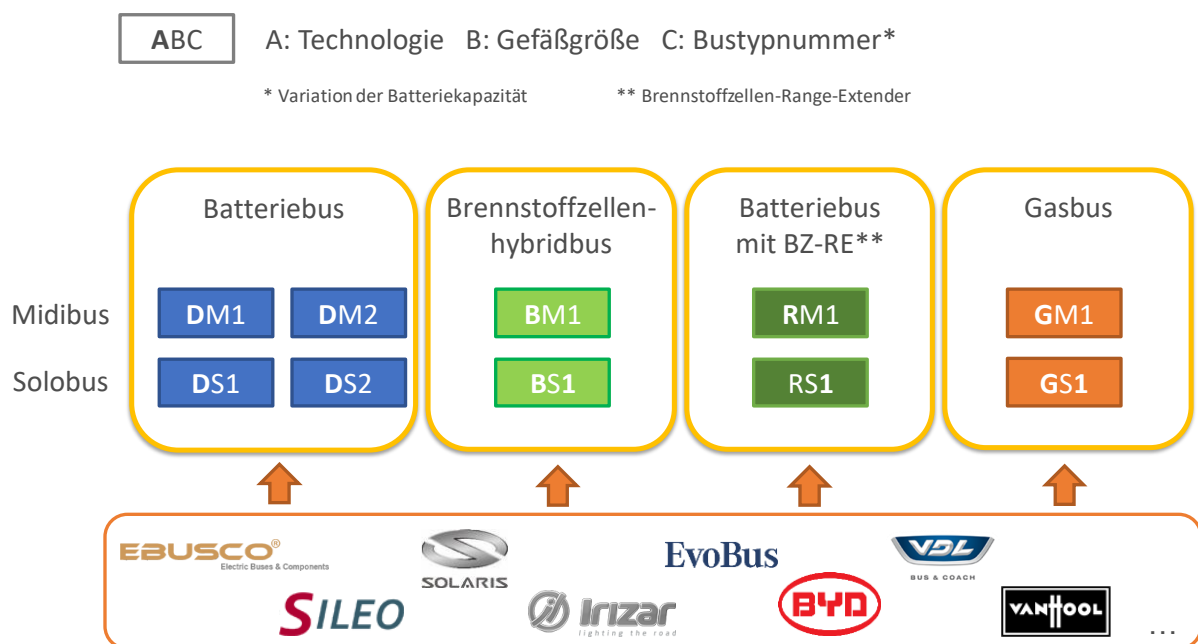


Abbildung 5: In der Studie betrachtete Referenzbustypen

¹ Einige Batteriebusse verwenden Heizsysteme mit fossilem Zusatzheizer, welche Schadstoffe emittieren. Darüber hinaus sind auch Fahrzeuge mit rein elektrischem Heizsystem nicht 100% emissionsfrei, da der Brems- und Reifenabrieb sowie Aufwirbelung von Straßenstaub weiterhin vorhanden sind.

² Darunter werden sowohl Brennstoffzellenhybridbusse als auch Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender gefasst (siehe Kapitel 1.2.1).

1.2.1.1 Batteriebusse

Bei Batteriebussen hängt die Reichweite direkt von der installierten Batteriekapazität ab. Aussagen zur technischen Machbarkeit und zu betrieblichen Mehraufwendungen sind daher stark durch diesen Parameter beeinflusst. Basierend auf den aktuell am Markt erhältlichen Systemen und einer Abschätzung der zukünftigen Entwicklung wurden insgesamt vier unterschiedliche Batteriegrößen (jeweils zwei für Midi- und Solobusse) festgelegt, welche in Tabelle 2 dargestellt sind.

Parameter	Batteriebus Typ 1		Batteriebus Typ 2	
	Midi - DM1	Solo - DS1	Midi - DM2	Solo - DS2
Batteriekapazität (installiert) [kWh]	180	250	225	350
Batteriekapazität (nutzbar) [kWh]	130	180	162	252
Ladeleistung Betriebshof [kW]	150	150	150	150

Tabelle 2: Technische Parameter der Batterie-Referenzbusse

Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die gewählten Werte im Vergleich zu den aktuellen Systemen am Markt. Insbesondere im Bereich der Solobusse ist ein vielfältiges Angebot an Herstellern mit unterschiedlichsten Batteriesystemgrößen vorhanden. Das Marktangebot für Midibusse ist deutlich beschränkter. Durch den Markteintritt von Heuliez und Irizar in diesem Bereich erweitert sich jedoch das zukünftige Marktangebot (erste Auslieferungen für Ende 2020 angekündigt).

Die Werte in der Marktübersicht beziehen sich auf die installierte Batteriekapazität. Die tatsächlich nutzbare Kapazität wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Batteriealterung, welche die nutzbare Kapazität kontinuierlich verringert. Bei Lithium-Ionen-Batterien wird das Lebensdauerende häufig durch einen Kapazitätsverlust von 20 % definiert. Weiterhin sind die Randbereiche des Ladezustands nur begrenzt nutzbar (Annahme hier 0 – 5 % und 95 – 100 %). Daraus ergibt sich eine über die gesamte Lebensdauer nutzbare Entladetiefe von 72 %.³

³ [Nutzbare Entladetiefe (72%)] = [Kapazität am Lebensende (80%)] x [nutzbares SOC-Band (90%)]

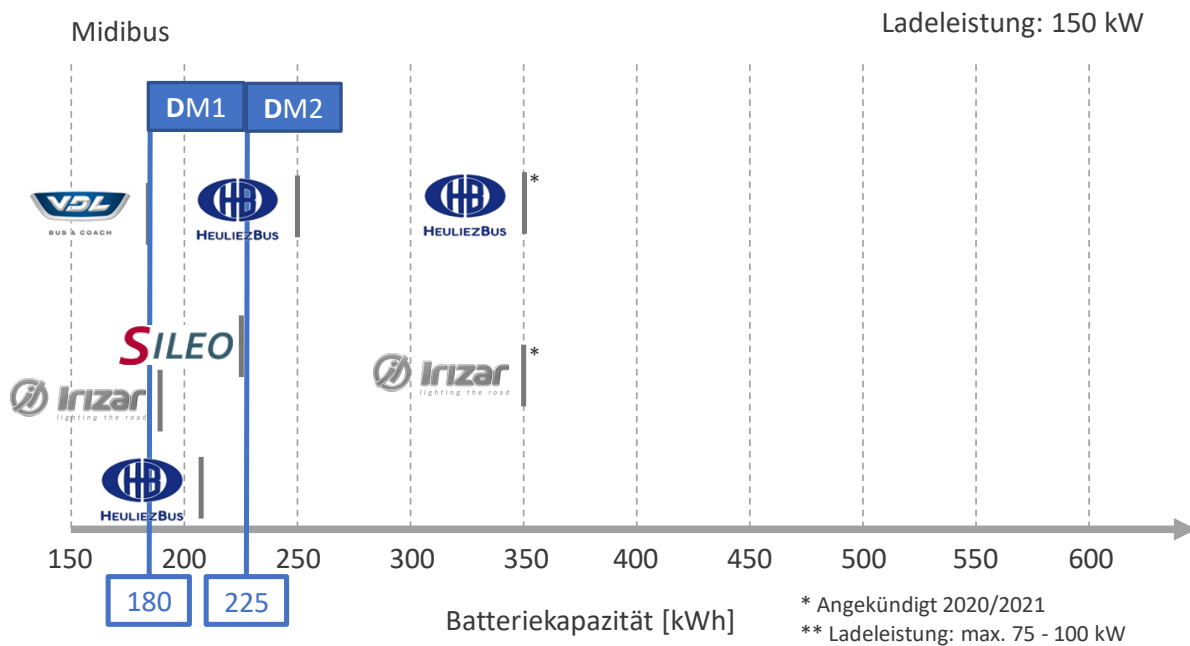


Abbildung 6: Batteriekapazitäten der Midi-Referenzbusse DM1 und DM2

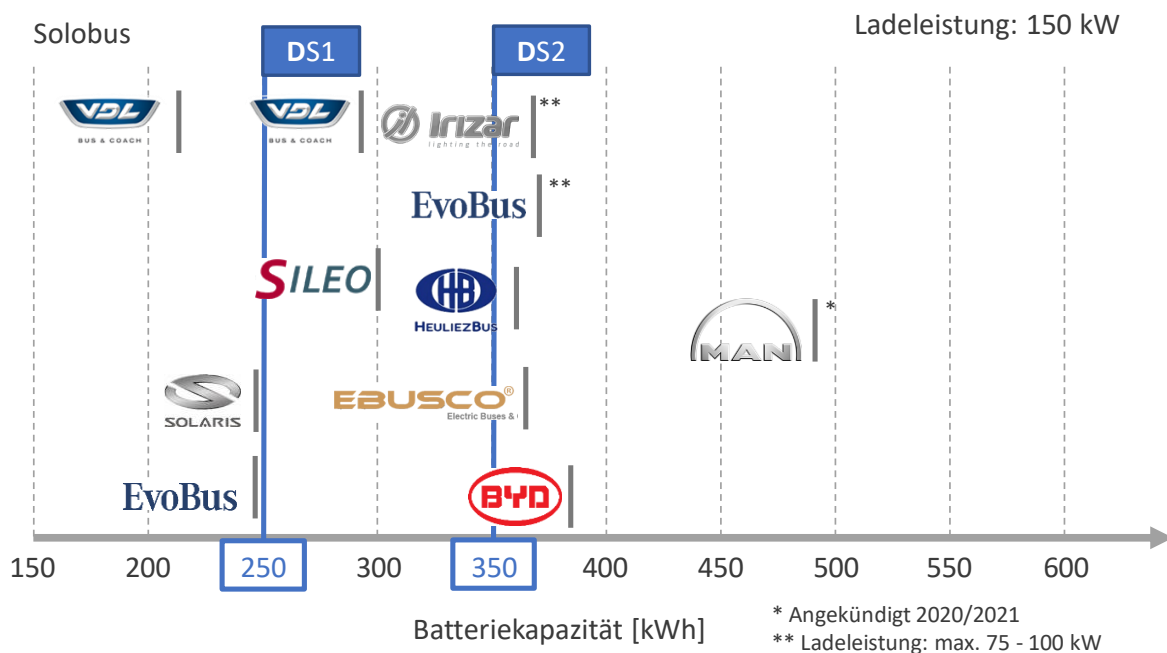


Abbildung 7: Batteriekapazitäten der Solo-Referenzbusse DS1 und DS2

1.2.1.2 Brennstoffzellenhybridbusse

Brennstoffzellenbusse sind grundsätzlich immer als Brennstoffzellenhybridbusse ausgeführt. Dies bedeutet, dass an Bord der Fahrzeuge ebenfalls Batterien verbaut sind, welche unter anderem ein Downsizing der Brennstoffzelle und die Aufnahme von Bremsenergie ermöglichen.

Die wesentlichen Merkmale des „Brennstoffzellenhybridbusses“ sind eine moderate Batteriekapazität und eine leistungsfähige Brennstoffzelle. Die Batteriekapazität beträgt sowohl für den Midibus (BM1) als auch für den Solobus (BS1) 30 kWh. Die Wasserstofftanks fassen 25 kg (BM1) bzw. 30 kg (BS1) und die Nennleistung der Brennstoffzelle liegt für beide Gefäßgrößen bei 100 kW. Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die gewählten Parameter. Die hier jeweils angenommenen Parameterwerte sind ebenfalls aufgrund des aktuell verfügbaren Marktangebots und angekündigter Modelle gewählt. Jedoch ist hier zu erwähnen, dass das Angebot für Brennstoffzellenhybridbusse sich auf seriennahe und Konzept- bzw. Prototypenfahrzeuge beläuft.

Parameter	Brennstoffzellenhybridbus	
	Midi – BM1	Solo – BS1
Batteriekapazität (installiert) [kWh]	30	30
H ₂ - Tankkapazität [kg]	25	35
Nennleistung Brennstoffzelle [kW]	100	100

Tabelle 3: Technische Parameter Brennstoffzellenhybrid-Referenzbusse

1.2.1.3 Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender

Der Batteriebus mit Brennstoffzellen-Range-Extender (BZ-RE) zeichnet sich dadurch aus, dass dieser im Gegensatz zum Brennstoffzellenhybridbus über eine hohe Batteriekapazität und eine geringe Brennstoffzellenleistung mit moderater Tankkapazität verfügt. Die Brennstoffzelle wird als Range-Extender betrieben und dient lediglich zur Vergrößerung der Reichweite, die durch die Batterie beschränkt ist. Eine Besonderheit des Batteriebusses mit BZ-RE ist, dass, zusätzlich zur Möglichkeit der Wasserstoffbetankung, Ladeinfrastruktur für das Nachladen der Batterie errichtet werden muss.

Für die Studie werden die Busse mit einer Batteriekapazität von 140 kWh (Midibus, RM1) bzw. 240 kWh (Solobus, RS1) definiert. Die Wasserstofftankkapazität ist zu 20 kg (RM1) bzw. 30 kg (RS1) angenommen. Die Nennleistungen der Brennstoffzellensysteme entsprechen bei beiden Typen 30 kW. Die Annahmen für die Referenzbustypen sind in Tabelle 4 nochmal zusammengefasst dargestellt. Ebenso wie bei Brennstoffzellenhybridbussen ist das Marktangebot sehr beschränkt, sodass die hier gewählten Werte sich an Konzept- und Prototypenfahrzeugen orientieren.

Parameter	Batteriebus mit BZ-RE	
	Midi - RM1	Solo - RS1
Batteriekapazität (installiert) [kWh]	140	240
H ₂ - Tankkapazität [kg]	20	30
Nennleistung Brennstoffzelle [kW]	30	30

Tabelle 4: Technische Parameter Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender

1.2.1.4 Gasbusse

Als vierte alternative Antriebstechnologie wurden Gasbusse betrachtet. Diese nutzen einen Verbrennungsmotor und werden mit Erdgas oder Biomethan betrieben. So werden ähnliche Reichweiten wie die der Dieselbusse möglich, welche ausreichend für die Umläufe des Stadtbussystems in Lindau sind. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Studie keine weitere Detaillierung der technischen Eigenschaften vorgenommen.

1.2.2 Nebenverbraucher und Klimatisierungskonzepte

Der Energiebedarf von Elektrobussen setzt sich aus zwei Kategorien zusammen. Zum einen benötigt das elektrische Antriebssystem Energie, um den Bus zu beschleunigen, zum anderen müssen die Nebenaggregate versorgt werden. Neben dem Druckluftkompressor, der Lenkunterstützung sowie den Informations- und Beleuchtungssystemen ist vor allem das Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystem (HLK) ein wesentlicher Verbraucher. In Elektrobussen fällt, im Gegensatz zu den Diesel- oder Gasbussen, kaum nutzbare Abwärme an, weshalb separate Heizsysteme verwendet werden müssen.

Eine Vorgabe für diese Studie war, dass die Elektrobusse gleiche Komfortmerkmale aufweisen wie die aktuellen Dieselbusse. Eine Vollklimatisierung der Fahrzeuge im Sommer ist daher erforderlich. Versorgt wird das Kühlsystem bei allen betrachteten Elektrobustypen mit elektrischer Energie. Für den Heizbetrieb im Winter gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die in den nachfolgenden Nebenverbraucherkonfigurationen zusammengefasst sind:

[ElHe] Vollelektrische Heizung bestehend aus Wärmepumpe und PTC Heizer

[HyHe] Hybridheizung bestehend aus Wärmepumpe und Kraftstoffzusatzheizer

Bei milden Temperaturen (ca. +3 bis +10 °C) ist es möglich, den Innenraum mit einer elektrisch betriebenen Wärmepumpe zu heizen. Bei tieferen Temperaturen arbeitet die Wärmepumpe weniger effizient, wodurch ein Zusatzheizsystem erforderlich wird. Bei einer Hybridheizung (HyHe) ist dieses ein Kraftstoffzusatzheizer, der in der Regel mit Diesel betrieben wird. Lösungen mit Bio-Ethanol sind technisch möglich, jedoch aktuell kaum verbreitet. Bei einem voll-

elektrischen Heizsystem (ElHe) wird hingegen ein elektrisches PTC-Hezelement (Positive Temperature Coefficient) eingesetzt. Hierdurch wird ein lokal emissionsfreier Betrieb ermöglicht, der hohe Bedarf an elektrischer Energie führt jedoch zu stark begrenzten Reichweiten. Brennstoffzellenbusse haben den Vorteil, dass ein Teil der Abwärme der Brennstoffzelle zum Heizen des Innenraums genutzt werden kann. Allerdings ist auch hier bei sehr tiefen Temperaturen eine Zusatzheizung erforderlich, die in den aktuell am Markt erhältlichen Fahrzeugen elektrisch ausgeführt ist, wodurch der lokal emissionsfreie Betrieb sichergestellt wird.

Zur Überprüfung der technischen Machbarkeit ist es erforderlich, den jeweils kritischsten Fall (Worst Case) einer Nebenverbraucherkonfiguration zu identifizieren und zu bewerten. Abbildung 8 zeigt eine schematische Darstellung und kennzeichnet die Worst-Case-Szenarien der elektrischen Leistung.

Für den Batteriebus mit vollelektrischer Zusatzheizung ist der Worst-Case der Winterbetrieb mit aktivem elektrischem Zusatzheizer. Für die Hybridheizung ist es umgekehrt, da ein Kraftstoffzusatzheizer verwendet wird. Hier ist der Sommerbetrieb für die maximale elektrische Nebenverbraucherleistung maßgebend. Der Brennstoffzellenbus mit vollelektrischer Zusatzheizung ähnelt dem Batteriebus mit Konfiguration B, allerdings ist der Leistungsbedarf durch die Nutzung eines Teils der Brennstoffzellenabwärme im Winter geringer. Im Rahmen der Studie wurden sowohl die vollelektrische Heizung als auch die Hybridheizung analysiert.

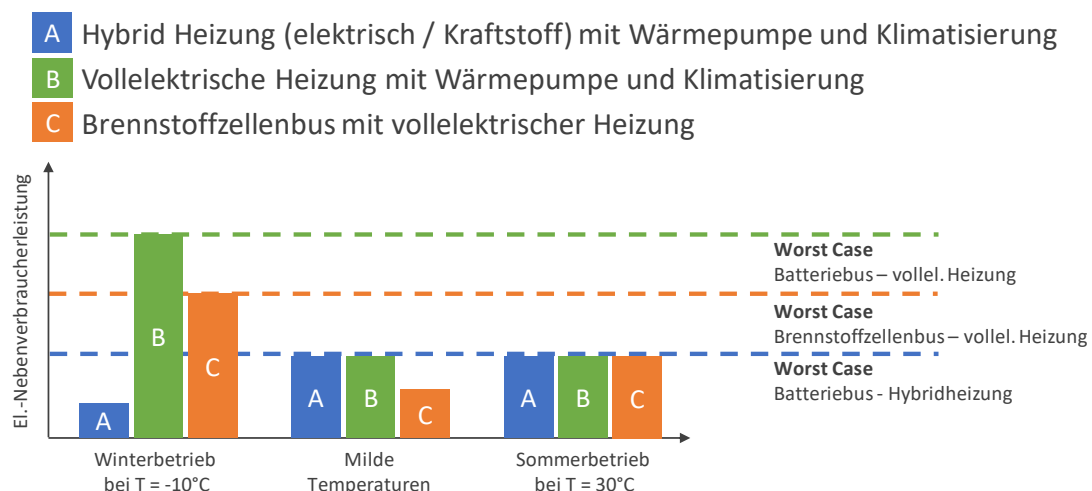


Abbildung 8: Schematische Darstellung der relevanten Worst-Case-Szenarien unterschiedlicher Nebenverbraucherkonfigurationen

1.2.3 Ladeinfrastruktur für Batteriebusse

In jedem Elektrifizierungsvorhaben spielt neben der Fahrzeugtechnik auch das Thema Infrastruktur eine wesentliche Rolle. Im Folgenden wird auf die notwendige Ladeinfrastruktur für Batteriebusse eingegangen, welche sich in die drei Elemente Netzanschluss, Ladegerät und Kopplungstechnik unterteilt.

Der Netzanschluss stellt die Versorgung der Ladeinfrastruktur mit elektrischer Energie sicher. Aufgrund der hohen Leistungsanforderung ist die Nutzung vorhandener Niederspannungsanschlüsse nur selten möglich. Sowohl an den Endstellen als auch in den Betriebshöfen müssen daher in den meisten Fällen neue Netzanschlüsse an das Mittelspannungsnetz und eine nachgelagerte Umspannung auf Niederspannung realisiert werden.

Aufgrund von Gewichts- und Bauraumbeschränkungen im Fahrzeug setzt die Mehrheit der Bushersteller derzeit auf externe DC-Ladegeräte (Gleichstrom-Ladegeräte), welche stationär installiert werden. Für die Ladung auf dem Betriebshof werden Ladegeräte mit bis zu 150 kW Ausgangsleistung eingesetzt. An diesem Wert und der Leistungsfähigkeit der definierten Referenzfahrzeuge orientiert sich die Studie.

Eine Alternative zu stationären Ladegeräten bieten fahrzeuginterne Ladegeräte. Durch dieses Konzept wird der stationäre Flächenbedarf deutlich reduziert, allerdings bringt die fahrzeugseitige Installation Konsequenzen für die Fahrgastkapazität und die installierbare Batteriegröße mit sich. Des Weiteren ist das Marktangebot hierfür stark eingeschränkt.



Abbildung 9: Varianten der konduktiven Kopplungstechnik

Die Energiezufuhr zum Fahrzeug erfolgt über die Kopplungstechnik. In der Vergangenheit haben sich konduktive Systeme am Markt durchgesetzt. Induktive Lösungen sind kaum verbreitet. Die gängigen konduktiven Lösungen sind in Abbildung 9 gezeigt. Die Varianten Stecker, Pantograph und Haube sowie invertierter Pantograph werden in der Regel für Konzepte mit externem Ladegerät genutzt, wohingegen die Lösung mit Pantographen und Oberleitung bei fahrzeuginternem Ladegerät verbaut wird.

Für eine Ladeleistung von maximal 150 kW sind Geräte, die mittels Stecker ohne Kühlung (Beschränkung auf 200 A) die Leistung übertragen, geeignet. Bei höheren Ladeleistungen werden die Fahrzeuge über Pantographen nachgeladen (siehe Abbildung 9).

1.2.4 Wasserstoffbereitstellung

Der Einsatz von Brennstoffzellenbussen erfordert die Bereitstellung von Wasserstoff, dessen ökologischer Fußabdruck von der Art seiner Erzeugung bestimmt wird. Unter der Maßgabe einer zu erzielenden CO₂-Reduktion bietet sich sogenannter „grüner Wasserstoff“ an, welcher mittels Elektrolyse aus elektrischer Energie von regenerativen Quellen erzeugt wird. Alternativ

kann Wasserstoff auch über Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen werden. Nebenprodukte dieses Prozesses sind allerdings global wirksame Emissionen wie CO_2 , in vergleichbarer Menge wie bei einer Verbrennung des fossilen Energieträgers. Im Rahmen der Studie wird daher die Verwendung von „grünem Wasserstoff“ betrachtet.

Die Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse kann sowohl in einer externen Anlage als auch auf dem Gelände des Betriebshofes erfolgen, sofern ausreichende Flächen für die Errichtung der Anlage zur Verfügung stehen. Extern erzeugter Wasserstoff kann entweder im gasförmigen (CGH_2), oder flüssigen (LH_2) Zustand angeliefert werden. Wesentliches Unterscheidungskriterium sind dabei die transportierbaren Mengen. Bei der Lieferung im gasförmigen Zustand können in einem LKW-Trailer maximal etwa 800 kg Wasserstoff angeliefert werden [2]. Bei dem Verbrauch eines Solobusses von 9 kg H_2 pro 100 km und einer täglichen Fahrleistung von 250 km entspricht dies dem dreifachen Tagesbedarf von 12 Solobussen. Erheblich größere Mengen können bei einer Anlieferung im flüssigen Zustand realisiert werden. Die Obergrenze liegt hier bei ca. 3,5 t, was fast dem 11-fachen Tagesbedarf von 12 Solobussen entspricht. Allerdings entstehen durch die Verflüssigung des Wasserstoffs Verluste, die in einem höheren Endpreis resultieren.

Auch wenn der Wasserstoff in flüssiger Form angeliefert wird, erfolgt die Betankung der Fahrzeuge immer mit gasförmigem Wasserstoff. Die am Markt erhältlichen Fahrzeuge nutzen ein 350 bar-Tanksystem mit Druckbehältern auf dem Fahrzeugdach. Die im PKW-Sektor diskutierten und zum Teil im Aufbau befindlichen 700 bar-Systeme haben im ÖPNV-Sektor bislang noch keinen Einzug gehalten und werden von Branchenexperten auch nicht favorisiert [2]. Abbildung 10 zeigt die schematische Zeichnung einer Wasserstofftankstelle für zehn Busse mit LH_2 -Anlieferung. Die Tankstelle besteht (neben dem LH_2 -Tank) aus einem Druckbehälter, einem Kompressor und der Zapfstelle. Aufgrund des regelmäßigen Kontroll- und Wartungsbedarfs werden die Systeme in der Regel ebenerdig installiert. Der Flächenbedarf beträgt in der dargestellten Ausführung für zehn Busse ca. 162 m^2 . Für höhere Tankkapazitäten werden zusätzliche Druckbehälter und Kompressoren benötigt, was in einem zusätzlichen Flächenbedarf resultiert.

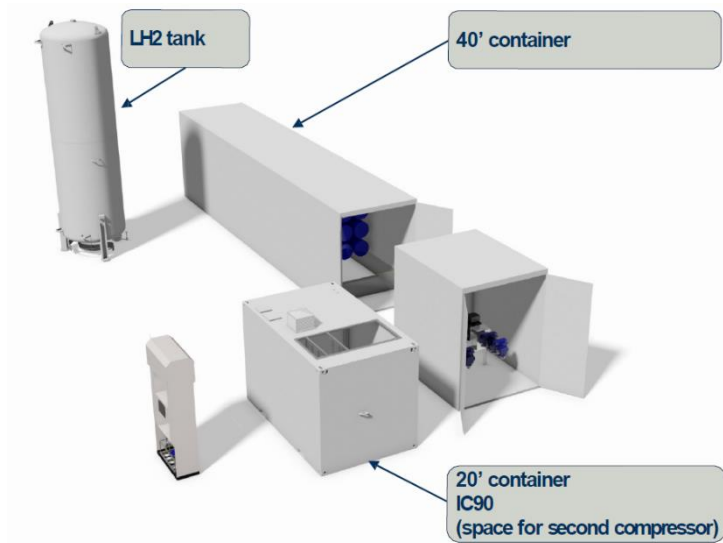


Abbildung 10: Schematische Darstellung einer Wasserstofftankstelle für 10 Busse [3]

Alternativ zur Anlieferung kann der Wasserstoff auch vor Ort („on-site“) erzeugt werden, wodurch der sehr energieintensive Verflüssigungsprozess entfällt. Der LH₂-Tank in Abbildung 10 wird in diesem Fall nicht mehr benötigt. Ein Elektrolyseur wandelt stattdessen mittels Elektrolyse Wasser in Wasserstoff um, welcher gasförmig gespeichert wird. Der Flächenbedarf für den Elektrolyseur und die weiteren Komponenten ist jedoch nicht unerheblich. Abbildung 11 verdeutlicht dies anhand einer Planungsgrundlage für eine Anlage zur täglichen Versorgung von rund 200 bis 250 Bussen. Da ein solches Konzept für Großflotten geplant ist, ist ein Vor-Ort-Elektrolyseur für Lindau nicht zu empfehlen. Stattdessen wäre die Anlieferung, wie oben beschrieben, oder das Tanken an externen Stellen eine Möglichkeit für die Versorgung der Flotte mit Wasserstoff.

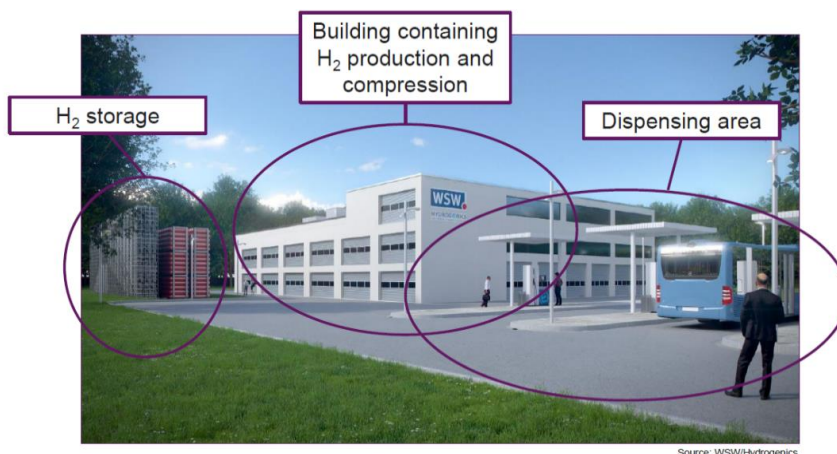


Abbildung 11: Wasserstofftankstelle mit Vor-Ort-Erzeugung mittels Elektrolyse für 200 bis 250 Busse [4]

1.3 Betriebshof Robert-Bosch-Straße

Die Umstellung auf alternative Antriebe hat direkte Konsequenzen auf den Betriebshof zur Folge. Zur Versorgung von Batterie-, Brennstoffzellen- und Gasbussen muss die jeweils erforderliche Infrastruktur installiert werden, die sowohl in Bezug auf den Platzbedarf als auch in Bezug auf den Netzanschluss neue Herausforderungen mit sich bringt. Weiterer Anpassungsbedarf ergibt sich für die Fahrzeughandhabung, die Betriebsabläufe sowie die Werkstatt. Aufgrund eines potentiellen Fahrzeugmehrbedarfs durch die Umstellung, gilt es weiterhin zu prüfen, in welchem Umfang zusätzliche Flächen für die Abstellung von Fahrzeugen verfügbar sind.

Die Fahrzeuge des Stadtverkehrs Lindau sind auf dem Betriebshof in der Robert-Bosch-Straße untergebracht. Zur Aufnahme der lokalen Situation erfolgte eine Begehung des Betriebshofs, deren Ergebnisse im Folgenden ausgeführt sind.

In Abbildung 12 ist ein Luftbild des Betriebshofs dargestellt. Neben Fahrzeugen des Stadtverkehrs Lindau werden dort ebenfalls Fahrzeuge der „Regionalbus Augsburg GmbH“ abgestellt. Die Kapazität für Fahrzeuge des Stadtverkehrs Lindau beträgt zurzeit 16 Busse (blau dargestellte Flächen in Abbildung 12). Aufgrund der Nähe zu den Stadtwerken, die sich süd-östlich vom Betriebshof befinden, ist der Anschluss an das Stromnetz mit geringem Aufwand realisierbar. Für die Errichtung von Ladeinfrastruktur sowie für den Aufbau notwendiger Transformatoranlagen und Netztechnik können ggf. die Flächen auf der Rückseite der Abstellhalle genutzt werden. Die Distanzen zwischen den Ladegeräten, den Kontaktierungspunkten und den Fahrzeugen sollten dabei möglichst geringgehalten werden, um Leitungsverluste zu minimieren.



Abbildung 12: Luftbild des Betriebshofs Robert-Bosch-Straße

Größere Freiflächen für die Errichtung einer Wasserstoff- oder einer Gastankstelle sind nicht vorhanden. Bei Einsatz dieser Antriebstechnologien müssen Tankstellen an anderen Stellen errichtet werden bzw. es müssen Tankstellen externer Betreiber genutzt werden. In der Studie wird angenommen, dass die Fahrzeuge auswärtig nachtanken müssen. Hierdurch entstehen jedoch zusätzliche Leerkilometer und zusätzliche Fahrerzeiten. Eine Tankfahrt beträgt ca. 4 km (Hin- und Rückweg) und die zusätzliche Fahrerzeit wird zu insgesamt 20 Minuten (10 min fahren, 10 min tanken) angenommen.

1.4 Potenzielle Ladeorte für Batteriebusse

Der Betrieb von Batteriebussen erfordert ein regelmäßiges Nachladen der Fahrzeuge. Ladeinfrastruktur muss daher – sowohl bei reinen Batteriebussen als auch bei Batteriebussen mit Brennstoffzellen-Range-Extender – im Betriebshof installiert werden.

Die Endstellen im sternförmig aufgebauten Liniennetz in Lindau sind keine linienübergreifenden Haltestellen, sodass diese jeweils gering frequentiert sind (alle halbe Stunde ein Fahrzeug). Aus diesem Grund wurden die Endstellen der Linien, die bei Umstellungskonzepten typischerweise als potentielle Ladeorte betrachtet werden, als solche ausgeschlossen. Lediglich die Haltestellen *Bahnhof/Insel* und *ZUP* wurden genauer auf deren Tauglichkeit als Ladeort geprüft.

An der Endstelle *Bahnhof/Insel* verkehrt ausschließlich die Linie 1A. Zu jeder halben Stunde hat das Fahrzeug eine Stillstandszeit von ca. 5 min. Diese Zeit könnte genutzt werden, um die

Fahrzeuge nachzuladen, um so die Reichweite und die Einsatzdauern der Midibusse zu erhöhen. Gemäß der Einschätzung der Abteilung für Netze und Anlagen des Stadtverkehrs Lindau ist aufgrund der Nähe zum Bahnhof ein Anschluss an das Stromnetz mit geringem Aufwand realisierbar.

Ein weiterer potentieller Ladeort ist, durch die zentrale Rolle und die hohe Frequentierung, der zentrale Umsteigeplatz (*ZUP*). An dieser Stelle befindet sich ebenfalls der Kundenservicepunkt sowie die Pausenräume der Fahrer. Aus dieser Sicht ist der *ZUP* als Ladeort sehr attraktiv. Jedoch ergeben sich dort mehrere Herausforderungen. Hierbei sind insbesondere die geringe Pausenzeit (3 min) sowie die eingeschränkten Platzverhältnisse zu nennen. Ein Nachladen während der regulären Standzeit im Liniendienst ist daher nicht sinnvoll möglich.

Eine Alternative ist jedoch der Fahrzeugtausch am *ZUP* unter Einbeziehung des Verfügungsfahrzeugs, welches in unmittelbarer Nähe abgestellt ist. Im aktuellen Betrieb wird das Fahrzeug morgens im Schülerverkehr eingesetzt und nachfolgend am *ZUP* als Reserve abgestellt, falls ein Bus im Liniendienst ausfällt. Aufgrund der eingeschränkten Platzverhältnisse bietet der *ZUP* die Möglichkeit, lediglich ein Fahrzeug abzustellen bzw. eine Ladestation zu errichten. Darüber hinaus gestaltet sich der Netzanschluss an diesem Ort als schwierig. Da sich in unmittelbarer Nähe kein direkter Stromanschluss befindet, müsste an dieser Stelle eine neue Transformatorstation errichtet und ein neues Mittelspannungskabel gelegt werden.

1.5 Kostenannahmen

Im Folgenden sind die Annahmen aufgeführt, welche zur Berechnung der Total Costs of Ownership (TCO) in der Wirtschaftlichkeitsanalyse herangezogen wurden. Die TCO entsprechen der Summe der diskontierten Zahlungsflüsse, die über den Betrachtungszeitraum für die unterschiedlichen Buskonzepte anfallen. In Abstimmung mit dem Stadtverkehr Lindau wird in dieser Studie ein effektiver Kalkulationszinssatz von 2 % verwendet. Der Betrachtungszeitraum wird zu 10 Jahren gewählt.

1.5.1 Fahrzeugkosten

Die in der Studie betrachteten Fahrzeugkosten beziehen sich bei den Elektrobussen auf die Investitionskosten für das Basisfahrzeug ohne Batterie bzw. Brennstoffzellensystem, aber inklusive elektrischem Antrieb. Das benötigte Batterie- bzw. Brennstoffzellensystem und deren Ersatzbeschaffung werden in der Kostenanalyse gesondert berücksichtigt. Bei dem Diesel-Referenzbus und dem Gasbus erfolgt diese Unterteilung nicht. Der Restwert der Busse beträgt nach der Nutzungsdauer technologieunabhängig 6,7 % des Kaufpreises.

Tabelle 5 gibt einen Überblick über die angenommenen Investitions- und Instandhaltungskosten. Hierbei werden die Fahrzeuganschaffungspreise sowohl inklusive als auch exklusive des Batterie- bzw. Brennstoffzellensystems abgebildet.

Bezeichnung	Gefäßgröße	Technologie	Fahrzeugpreis (exkl. Batterie-/BZ-System) in €	Fahrzeugpreis (inkl. Batterie-/BZ-System) in €	Instandhaltung in €/km
DM1	Midibus	Batteriebus Typ 1	300.000	435.000	0,37
DM2	Midibus	Batteriebus Typ 2	300.000	468.750	0,37
DS1	Solobus	Batteriebus Typ 1	350.000	537.500	0,37
DS2	Solobus	Batteriebus Typ 2	350.000	612.500	0,37
BM1	Midibus	BZ - Hybridbus	350.000	622.500	0,5
BS1	Solobus	BZ - Hybridbus	400.000	672.500	0,5
RM1	Midibus	BZ - Range Extender	350.000	498.820	0,5
RS1	Solobus	BZ - Range Extender	400.000	655.120	0,5
Gas Midibus	Midibus	Gasbus	340.000	-	0,42
Gas Solobus	Solobus	Gasbus	360.000	-	0,42
Diesel Midibus	Midibus	Diesel-Referenz	280.000	-	0,37
Diesel Solobus	Solobus	Diesel-Referenz	300.000	-	0,37

Tabelle 5: Kostenannahmen Fahrzeuge (inkl. Nachrichtentechnik, mit und ohne Batterie-/Brennstoffzellensystem) und Instandhaltung

Die Investitionskosten eines Elektrobusse inkl. Batterie- / Brennstoffzellensystem liegen derzeit rund 55-125 % höher als bei einem Dieselbus. Die aktuelle Marktsituation im Elektrobusbereich ist zudem durch eine starke Nachfrage gekennzeichnet, welche auf ein begrenztes Herstellerangebot trifft. Die „Clean Vehicle Directive“ sowie nationale Förderprogramme tragen weiterhin dazu bei, dass die Nachfrage stetig zunimmt.

Die angegebenen Instandhaltungskosten ergeben sich aus den zurückgelegten Kilometer (Leer- und Nutzungskilometer). Für die Dieselbusse wurden diese in Abstimmung mit dem Stadtverkehr Lindau für Midi- und Solobusse auf 0,37 €/km beziffert. Bezüglich der Instandhaltungskosten der Elektrobusssysteme gibt es bislang noch keine belastbaren Aussagen. Der elektrische Antrieb selbst bietet zwar grundsätzlich das Potential eines wartungsärmeren Betriebs als konventionelle Antriebe, jedoch resultiert ein nicht unerheblicher Teil der Wartungs- und Instandhaltungskosten aus Komponenten, die nicht direkt dem Antrieb zugeordnet sind (z.B. Türantriebe etc.). Aufgrund dessen werden für Elektrobusse die Instandhaltungskosten pro gefahrenen Kilometer auf dem Niveau der Dieselbusse angesetzt. Diese Annahme deckt sich mit Abschätzungen, die Hersteller als Richtwert angeben. Die Instandhaltungskosten der Brennstoffzellenbusse sind, aufgrund des komplexeren Systems aus Brennstoffzelle und Batterie, um ca. 13 ct/km höher angesetzt als bei Diesel- oder reinen Batteriebusen.

An dieser Stelle ist zu beachten, dass im Rahmen dieser Studie der Austausch von Batterie- und Brennstoffzellensystemen nicht als Instandhaltungskosten angesetzt wird. Der Austauschbedarf wird separat linien- und kostenspezifisch ermittelt und in die Rubrik „Batterie- und Brennstoffzellenkosten“ inkludiert (s. Kapitel 1.5.2).

1.5.2 Batterie- und Brennstoffzellenkosten

Wesentliche Komponenten in den Elektrobussen sind die Batterie- und Brennstoffzellensysteme. Sie bestimmen die technische Leistungsfähigkeit, aber auch die Kosten. Es ist davon auszugehen, dass ihre Lebensdauer geringer ist, als die des übrigen Fahrzeugs und dass Ersatzbeschaffungen im Betrachtungszeitraum notwendig werden.

Die Anforderungen an Batteriesysteme unterscheiden sich je nach favorisierter Nutzung. Bei Batterien für Batteriebusse steht vor allem die hohe Energiedichte im Vordergrund. Sie weisen geringere spezifische Kosten auf als beispielsweise Batteriesysteme, die für Schnellladung an den Endstellen ausgelegt sind. In dieser Studie werden spezifische Kosten von 750 €/kWh angenommen.

Die Bewertung der Batterielebensdauer erfolgt auf Basis der jeweiligen Nutzung im Liniendienst. Die Lebensdauer des Batteriesystems ist dabei als äquivalente Vollzyklen (Anzahl möglicher Kapazitätsdurchsätze bezogen auf Anfangskapazität) abgebildet und wird hier mit 2500 angenommen. Bei der Kostenrechnung erfolgt auf dieser Grundlage eine Bestimmung der benötigten Ersatzbeschaffungen, für jede Linie und jedes Fahrzeugkonzept individuell.

Für die Brennstoffzellensysteme werden die spezifischen Kosten zu 2.500 €/kW angenommen. Die Lebensdauer einer Brennstoffzelle wird von den Herstellern für gewöhnlich in Stunden angegeben. Mit aktuellen Systemen ist es möglich, eine Lebensdauer von über 25.000 Betriebsstunden zu erzielen, welche für die Studie angenommen wurde. Wie auch für die Batteriesysteme, erfolgt die Bestimmung von Austauschintervallen im Rahmen dieser Studie anhand der tatsächlichen Belastung (hier: Betriebsstunden).

Um den potentiellen Markthochlauf entsprechend zu berücksichtigen, wurde für die Batterie- und Brennstoffzellensysteme ein linearer Preisverfall von 30 % im 10-jährigen Betrachtungszeitraum angenommen. Ersatzbeschaffungen erfolgen ebenfalls zu diesen reduzierten Kostensätzen. Ersatzsysteme, die zum Ende des Betrachtungszeitraums noch funktionsfähig sind, werden mit ihrem Restwert in der Kostenrechnung berücksichtigt. Durch diese Betrachtung wird der Effekt des fixen Betrachtungszeitraums von 10 Jahren abgemildert. Ansonsten würden sich Batterie-neubeschaffungen nach bspw. 9 Jahren sehr nachteilig auf die Kosten auswirken.

1.5.3 Energiekosten

Im Rahmen der Studie werden die Energiekosten für unterschiedliche Energieträger betrachtet. Die Kosten für den Energieträger Diesel beziffern sich nach Angaben des Stadtverkehrs Lindau auf 1,01 €/l. Des Weiteren wird eine Preissteigerung von 5,24 % angenommen (an Strompreissteigerung angepasst, siehe unten). Dieser Wert ist hoch angesetzt (Mittelwert der Dieselpreissteigerung der letzten 10 Jahre beläuft sich auf 1,57 %), da im Kontext des Klimaschutzpaketes derzeit eher konservative Annahmen sinnvoll sind.

In der Studie wird unterstellt, dass die Gasbusse ausschließlich mit Biomethan betrieben werden. Für den spezifischen Gaspreis werden hierfür 0,924 €/kg [3] angenommen. Analog zum Dieselpreis wird für den Gaspreis eine Steigerung von 5,24 % unterstellt.

Die Kosten für den Strombezug hängen von mehreren Faktoren ab. Der erste Faktor ist der Strompreis pro bezogene kWh Energiemenge. In dieser Studie wird mit einem Strompreis von 18,09 ct/kWh kalkuliert⁴. Neben dem Energiepreis fallen auch leistungsbezogene Netzaufgaben an, welche von der jeweiligen Netzebene abhängen. Diese belaufen sich hier auf 94,29 €/kW. Die Kostensteigerung wird mit 5,24% auf den Mittelwert der Strompreissteigerung der letzten 10 Jahre gesetzt.

Die Energiekosten des benötigten Wasserstoffs werden zu 10 €/kg angenommen. Die konservative Abschätzung berücksichtigt dabei eine perspektivische Nachtankung mit grünem statt grauem Wasserstoff.⁵ Wie in Kapitel 1.3 angedeutet, kann keine eigene Tankstelle auf dem Betriebshof errichtet werden. Die Fahrzeuge werden an einer externen Tankstelle betankt. In der Studie wird unterstellt, dass dadurch zusätzliche 4 km Leerfahrten pro Tag und Fahrzeug sowie 20 zusätzliche Minuten Fahrzeit anfallen. Diese Kosten hierfür werden in der Wirtschaftlichkeitsrechnung berücksichtigt. Außerdem wird ebenfalls eine Steigerung des Wasserstoffpreises von 5,24 % angenommen, da Wasserstoff mittels Elektrolyse und somit Strom hergestellt werden muss.

1.5.4 Infrastrukturkosten für Batteriebusse

Ladeinfrastruktur für Batteriebusse wird in verschiedensten Leistungsklassen angeboten. In der Studie wurden Ladegeräte mit einer maximalen Ausgangsladeleistung von 150 kW betrachtet. Dies entspricht der maximal übertragbaren Ladeleistung bei derzeit verfügbaren Stecksystemen (CCS-Stecker).

Die Kostenannahmen wurden aus den aktuell am Markt üblichen Preisen abgeleitet. Dementsprechend wurden für ein 150 kW Ladegerät Anschaffungskosten von ca. 95.000 € angenommen. Die definierten Kostenannahmen umfassen die komplette Hardware, deren Errichtung und die Inbetriebnahme einer Ladestation auf dem Betriebshof. Für die Instandhaltungskosten wurden jeweils 5 % der Anschaffungskosten angenommen.

Zur vollständigen Berechnung der Infrastrukturkosten müssen, neben den Kosten für Ladegeräte, ebenfalls die Kosten für den Netzanschluss betrachtet werden. Darunter fallen insbesondere der Baukostenzuschuss sowie die Kosten zur Errichtung der Stromversorgungsinfrastruktur.

⁴ Annahme: Industriestrompreis 2019 abzgl. Stromsteuerreduktion für Elektrobusse von 0,91 ct/kWh

⁵ Sogenannter „grauer Wasserstoff“ entsteht meist als Nebenprodukt bei energieintensiven Industrieanlagen oder wird mit fossilen Energiequellen erzeugt. „Grüner Wasserstoff“ basiert auf der Herstellung mit regenerativen Energiequellen.

tur. Der Baukostenzuschuss beträgt 94 €/kW. Die Kosten für die Errichtung der Stromversorgungsinfrastruktur wurden zu 350 €/kW angenommen. Die Stromversorgungsinfrastruktur umfasst dabei die Mittelspannungsschaltanlagen, die Transformatoren sowie alle AC-Kabelverbindungen. Die Kosten für die Herrichtung des Netzanschlusses variieren in Abhängigkeit der möglichen Ladeorte. Die Kosten auf dem Betriebshof belaufen sich gemäß der Abteilung für Netze und Anlagen des Stadtverkehrs Lindau auf 25.000 €, am ZUP auf 70.000 € und am Bahnhof auf 7.000 €.

1.5.5 Kosten für zusätzliche Fahrzeit

Die begrenzten Reichweiten der Batteriebusse erfordern unter Umständen Anpassungen der Betriebsplanung, sodass sich ein erhöhter Bedarf an Fahrzeugen und Leerfahrten ergeben kann. Aufgrund der angenommenen externen Tankstelle werden bei Brennstoffzellenfahrzeugen und Gasbussen zusätzliche Tankfahrten notwendig.

Ein erheblicher Kostenfaktor ist dabei die zusätzliche Fahrzeit. Der Stadtverkehr Lindau bezifferte die Fahrpersonalkosten im Jahr 2018 auf 25 €/h. In der Studie wurde eine mittlere jährliche Steigerung von 2,38 % angenommen. Der mittlere Stundensatz im Betrachtungszeitraum von 10 Jahren ergibt daher 28,32 €/h.

1.5.6 Förderung

Im Zuge der Wirtschaftlichkeitsrechnung werden einerseits die Investitionskosten inkl. einer Landesförderung und zum anderen mit einer zusätzlichen Bundesförderung betrachtet. Die Landesförderung aus Bayern [4] beträgt für Diesel- und Gasbusse 42.000 € pro Midibus und 60.000 € pro Solobus. Für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge werden pro Fahrzeug zusätzliche 10.000 € gefördert.

Darüber hinaus wird ebenfalls das Förderprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung berücksichtigt. Diese betragen zurzeit bis zu 80 % für die Fahrzeugmehrkosten sowie bis zu 40 % für die Ladefraserstruktur. Der notwendige Netzanschluss wird nicht gefördert. Dabei liegt die Mindestzahl der zu beschaffenden Fahrzeuge bei sechs Bussen. Zu beachten ist, dass lediglich die Mehrkosten eines Fahrzeugs (inklusive Batterie- oder Brennstoffzellensystem) gegenüber eines Dieselmusses förderfähig sind.

1.6 Besondere Herausforderungen in Lindau

Im Rahmen der Umstellung der Busflotte des Stadtverkehrs Lindau auf alternative Antriebe müssen, neben den technischen Herausforderungen, weitere Faktoren und standortspezifische Besonderheiten beachtet werden. Eine Einschränkung bei der Betrachtung stellt die teils

bestehende Höhenbegrenzung auf der Linie 4 dar. Dort können die Dieselsolobusse nicht einfach durch Batteriesolobusse ersetzt werden, da letztere aufgrund der verbauten Leistungselektronik und Batterien auf dem Fahrzeugdach eine Höhe von 3,4 m erreichen (z.B. der Solaris Urbino 12 Electric). Die beschränkende Durchfahrt unter der Eisenbahnbrücke Wackerstraße erlaubt jedoch nur 3,10 m. Die gleiche Problematik ergibt sich ebenfalls für Brennstoffzellen und Gasbusse, deren Tanks ebenfalls auf dem Dach untergebracht sind.

Aufgrund der Höhenbegrenzung werden innerhalb der Studie zwei Varianten betrachtet. Zum einen wird eine Umstellung auf alternative Antriebe inklusive der Fahrleistung der Linie 4 analysiert und zum anderen wird ein Szenario betrachtet, in dem die Fahrleistung der Linie 4 weiterhin mit Dieselbussen erbracht wird.

2. Technische und betriebliche Analyse (AP 2)

Die technische und betriebliche Analyse der Elektrobuskonzepte erfolgte auf Basis der fahplanerischen Daten des Bedienungsgebiets des Stadtverkehrs Lindau. Zielsetzung dabei war, die technischen Grundlagen (Energieverbräuche, Wasserstoffverbräuche, minimale Batteriegrößen, benötigte Ladestationen) und die betrieblichen Konsequenzen (Anzahl der benötigten Fahrzeuge) zu ermitteln, die anschließend als Eingangsdaten für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (AP 3) dienen.

Im Gegensatz zu Diesel- und Gasbussen gibt es bei Elektrobussen wesentliche Rahmenbedingungen, welche die technische Machbarkeit einer Elektrifizierung und den Betrieb erheblich beeinflussen. Für Batteriebusse ist hier vor allem die begrenzte Batteriekapazität zu nennen, welche zur Folge hat, dass Dieselbusumläufe mit hohen Fahrleistungen nicht ohne Anpassungen darstellbar sind. Bei Brennstoffzellenbussen sind die betrieblichen Konsequenzen aufgrund der höheren Reichweite geringer. Abhängig von den Einsatzbedingungen kann aber auch hier eine Umgestaltung der Umläufe und eine Begrenzung der Fahrleistung notwendig werden. Bei einem Einsatz von Gasbussen werden keine betrieblichen Anpassungen notwendig und der Fahrbetrieb kann vergleichbar zum Dieselbusbetrieb durchgeführt werden. Die genannten Rahmenbedingungen wurden in der Studie für die Fahrleistung detailliert untersucht. Die dabei verwendete Methodik und die Kriterien sind nachfolgend erläutert.

2.1 Methodik und Kriterien

Die Bewertung der technischen Machbarkeit und die Bestimmung der betrieblichen Mehraufwendungen erfolgte unter der Maßgabe, dass ein zuverlässiger Betrieb unter allen Bedingungen gewährleistet sein muss. Zum einen bezieht sich diese Vorgabe auf die Einsatzbedingungen (wie z.B. den Worst-Case-Energiebedarf der Nebenverbraucher), zum anderen auf den technischen Zustand der Fahrzeuge, wie beispielsweise der Kapazitätsverlust der Batterie durch Alterung. Daher wurde die jeweils ungünstigste Kombination angenommen, bestehend aus maximalem Energiebedarf der Nebenverbraucher und gealterter Batterie am Ende der Lebensdauer (80 % Restkapazität).

Im Unterschied zu einer reinen Machbarkeitsprüfung, deren Ergebnis die Aussage „machbar bzw. nicht machbar“ wäre, wurden im Rahmen dieser Studie auch die betrieblichen Anpassungen untersucht, mit denen eine Elektrifizierung umsetzbar ist. Für Batteriebusse bedeutet dies zum Beispiel, dass Umläufe mit einem zu hohen Energiebedarf unterteilt und Zwischenladungen auf dem Betriebshof in den Betriebsablauf integriert werden müssen. Abhängig von der Liniencharakteristik ergibt sich hieraus ein Fahrzeugmehrbedarf, zusätzliche Fahrzeit und Leerkilometer, welche im Rahmen der Analyse erfasst und in der späteren Kostenrechnung berücksichtigt werden.

Die Fahrleistung der einzelnen Gefäßgrößen wurde gebündelt betrachtet, sodass die Fahrzeuge nicht zwingend linienrein fahren müssen. Beispielsweise kann ein Fahrzeug, das morgens auf der Linie 2 genutzt wird, nachmittags auf der Linie 3 verkehren. Die Definition von unterschiedlichen Fahrzeugtypen, Nebenverbraucher-Konfigurationen und Szenarien führt zu einem umfassenden Ergebnisraum. Für jede Variation wurden alle Permutationen analysiert und bewertet. Abbildung 13 veranschaulicht den Zusammenhang der Ergebnisse.

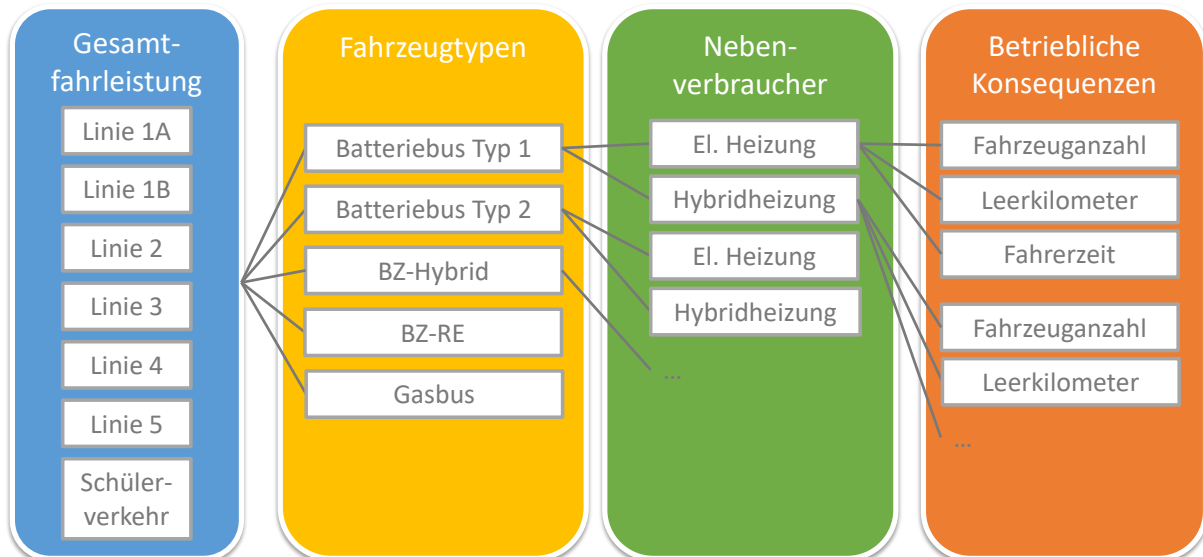


Abbildung 13: Zusammenhang der Ergebnisse für alle Linien mit den unterschiedlichen Szenarien, Fahrzeugtypen und Nebenverbraucherkonfigurationen

2.2 Detailergebnisse

In der folgenden Diskussion werden die notwendigen betrieblichen Anpassungen der unterschiedlichen Elektrifizierungsoptionen für die Linien 1A, 1B, 2, 3, 4 und 5 vorgestellt. Zunächst werden in den Kapiteln 2.2.1 bis 2.2.3 die Ergebnisse der technischen und betrieblichen Analyse im Detail erläutert. In Kapitel 2.3 werden abschließend alle Ergebnisse in einer Übersicht dargestellt und diskutiert.

2.2.1 Ergebnisse Linie 1A (Midibusse)

In der zukünftig geplanten Anpassung des Liniendienstes verkehrt die Linie 1A zwischen den Endstellen *Anheggerstraße (ZUP)* und *Bahnhof/Insel*. Hierbei ist der Einsatz eines Midibusses erforderlich, da die Linie durch den Inselkern führt. Am anspruchsvollsten Betriebstag werden mit diesem Bus insgesamt 157 km Liniendienst absolviert. Die Leerkilometer belaufen sich in Summe auf 8 km pro Tag.

In Abbildung 14 ist der Betrieb mit Dieselnissen dargestellt, was ebenfalls dem Umlaufplan bei Einsatz eines Gasbusses entspricht. Fahrplanfahrten sind dabei in blau gekennzeichnet, die weißen Flächen dazwischen entsprechen Pausenzeiten an den Endstellen und Leerfahrten

sind in hellblau dargestellt. Trotz der geringen Fahrleistung liegt die Einsatzdauer des Fahrzeugs bei ca. 15 h, bedingt durch eine niedrige Durchschnittsgeschwindigkeit im Liniendienst von rund 11 km/h.

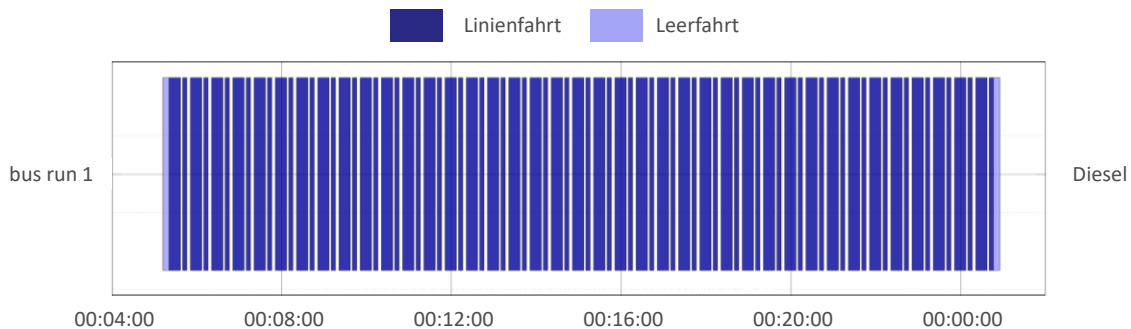


Abbildung 14: Betrieb der Linie 1A mit einem Diesebus. Entspricht auch dem Einsatz von Gasbussen.

Batteriebusse

Die Analyse des Batteriebusseinsatzes hat gezeigt, dass, trotz der moderaten täglichen Fahrleistung, der Umlauf nicht mit einem Batteriebus darstellbar ist. Die niedrige Durchschnittsgeschwindigkeit im Liniendienst führt zu einem erhöhten Energiebedarf. Ursächlich hierfür sind die elektrischen Nebenverbraucher (u.a. das Heiz- und Klimatisierungssystem). Der hohe Energiebedarf reduziert die Reichweite, wodurch für jedes Batteriebuskonzept ein zusätzliches Fahrzeug benötigt wird.

Sowohl der Einsatz eines Batteriebusses Typ 1 (180 kWh Batteriekapazität) als auch des Typ 2 (225 kWh Batteriekapazität) ergeben die gleiche Anzahl zusätzlich benötigter Fahrzeuge, unabhängig davon, ob eine vollelektrische Heizung (ElHe) oder Hybridheizung (HyHe) verwendet wird. Lediglich die Aufteilung der Linien- (dunkelblau) und Leerfahrten (hellblau), sowie die Ladefenster (untertägig (gelb) oder über Nacht (orange)) verschieben sich. In Abbildung 15 wird exemplarisch der Betrieb der Linie 1A mit dem Batteriebus Typ 1 und Hybridheizung gezeigt.

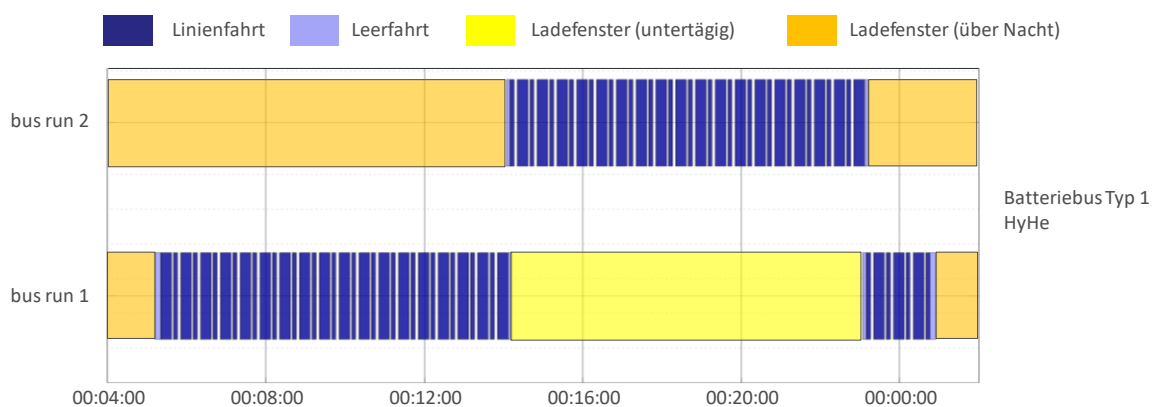


Abbildung 15: Betrieb der Linie 1A mit Batteriebus Typ 1 und Hybridheizung

Ein Fahrzeug muss untertägig zurück zum Betriebshof, um nachzuladen. Die Ladezeitfenster sind so angeordnet, dass immer ein Fahrzeug auf der Linie im Einsatz ist. Die Ladephasen im Betriebshof haben jedoch zur Folge, dass sich die Leerkilometer von zuvor 8 km auf bis zu 23 km (Typ 1 ElHe) nahezu verdreifachen.

Neben der ausschließlichen Nachladung im Betriebshof wurde für die Linie 1A ebenfalls die Zwischenladung an der Endstelle *Bahnhof/Insel* untersucht. Zu jeder halben Stunde hat die Linie 1A dort eine Stillstandszeit von 5 Minuten. Nach Abzug von Kopplungszeiten und Verspätungspuffer (insgesamt ca. 3 Minuten pro Ladephase) verbleiben insgesamt ca. 2 Minuten effektive Ladezeit. Geprüft wurde hier, ob im Gegensatz zum reinen Nachladen auf dem Betriebshof, ein Betrieb ohne Fahrzeugmehrbedarf möglich ist.

In Abbildung 16 ist der Ladezustandsverlauf eines Fahrzeugs auf der Linie 1A mit einer regelmäßigen Nachladung am Bahnhof gezeigt. Der Batterie-Midibus ist dabei mit großer Batteriekapazität sowie Hybridheizung ausgestattet. Dies entspricht dem energetisch günstigsten Fall. Die in grün dargestellten Balken entsprechen den kurzen Ladephasen am Bahnhof. Der kleinere grüne Balken zwischen ca. 0:30 und 2:00 entspricht einer Ladung nach Beendigung des Linienbetriebs im Betriebshof mit reduzierter Ladeleistung. Die in blau dargestellten Kurven stellen die Ladezustandsverläufe der Batterie für zwei Fälle dar.

Der erste Fall (durchgezogene blaue Kurve, oben) entspricht dem Ladezustandsverlauf für den „Normalfall“. Dieser ist definiert für den durchschnittlichen Leistungsbedarf der Nebenverbraucher (Heizung, Lüftung, Klimatisierung, etc.) im Jahresmittel sowie der maximal verfügbaren Batteriekapazität am Anfang der Lebensdauer. Der Ladezustand sinkt nicht unter 65 % des nutzbaren Energieinhalts der Batterie, sodass der Betrieb im „Normalfall“ mit nur einem Fahrzeug möglich wäre.

Der zweite Fall (blau gestrichelte Kurve, unten) entspricht dem „Extremfall“, welcher die anspruchsvollsten Betriebsbedingungen definiert. Hierbei ist der Leistungsbedarf der Nebenverbraucher besonders hoch. Für den Fall einer Nebenverbraucherkonfiguration mit Hybridheizung entspricht dies besonders heißen Tagen. Zudem wurde die verfügbare Batteriekapazität am Lebensdauerende zu Grunde gelegt. In Abbildung 16 wird deutlich, dass der Ladezustand der Batterie deutlich schneller sinkt und am Ende des Betriebstags 30 % beträgt.

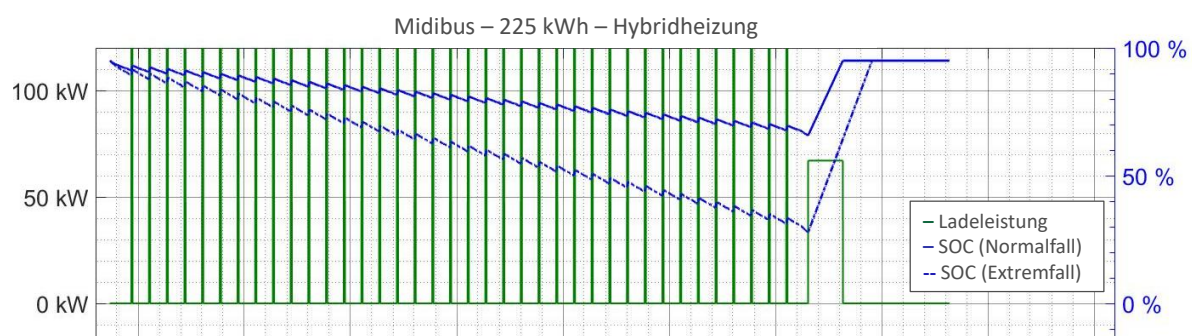


Abbildung 16: Ladezustandsverlauf bei regelmäßiger Ladung am Bahnhof - Linie 1A

Eine große Herausforderung dieses Szenarios ist jedoch das regelmäßige Nachladen. Die zur Verfügung stehende Stillstandszeit an der Endstelle kann durch die Verkehrssituation wesentlich beeinflusst werden. Hierbei können Verzögerungen auf dem Linienweg oder längere Haltezeiten an Ampeln die Fahrzeit der Linie verlängern, sodass die Haltezeit an der Endstelle für einen Verspätungsausgleich genutzt werden muss. Dies hätte zur Folge, dass Ladephasen ausfallen können.

In Abbildung 17 wird der Ladezustandsverlauf mit unregelmäßigen Nachladungen gezeigt. Dabei wird unterstellt, dass jede dritte Anfahrt am Bahnhof aus oben genannten Gründen nicht für eine Nachladung genutzt werden kann. Insbesondere für den Extremfall ist zu erkennen, dass der Betrieb technisch nicht möglich ist, da gegen Ende des Betriebstags der Ladezustand in den unteren Randbereich der Batterie fällt. Die Randbereiche (SOC > 95% und SOC < 5%) sind aus Alterungsgründen der Batterie nicht sinnvoll nutzbar. Sofern also 33 % der möglichen Ladephasen an der Endstelle ausfallen, ist der Einsatz nur eines Fahrzeugs nicht mehr möglich.

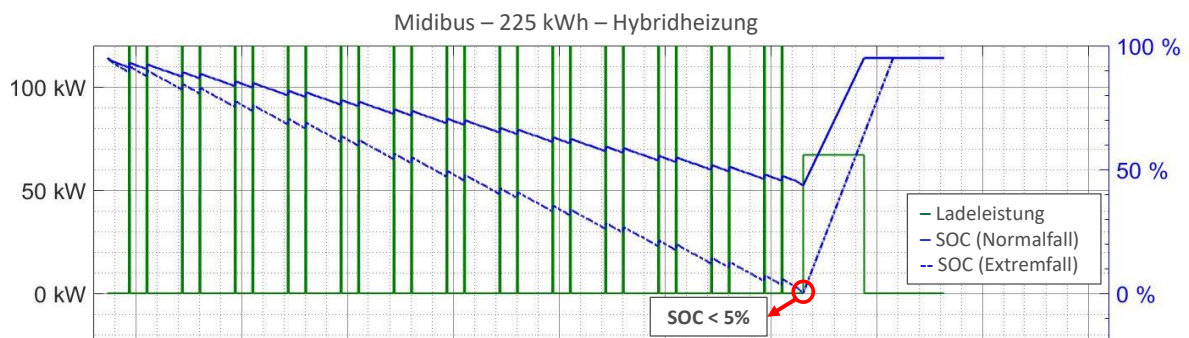


Abbildung 17: Ladezustandsverlauf bei unregelmäßiger Ladung am Bahnhof - Linie 1A

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Betrieb der Linie 1A mit lediglich einem Midibus und Zwischenladung am Bahnhof nur eingeschränkt möglich ist. Bei wenigen Ausfällen der Ladephasen ist ein Betrieb nicht mehr möglich. Darüber hinaus hat dieses betriebliche Konzept den Nachteil, dass bei jeder Ladephase der Fahrer aussteigen und das Kabel für wenige Minuten anstecken muss. Insbesondere durch die geringen und leicht beeinflussbaren Ladephasen ist ein solcher Betrieb sehr instabil und im schlechtesten Fall kann der Liniendienst nicht vollständig erbracht werden.

Brennstoffzellenbusse

Aufgrund der hohen Energiedichte von Wasserstoff haben Brennstoffzellenbusse eine höhere Reichweite als Batteriebusse. Da jedoch die Linie 1A eine sehr geringe Durchschnittsgeschwindigkeit hat und der Fahrbetrieb über 15 Stunden dauert, genügt die Reichweite der Brennstoffzellenbusse nicht, sodass auch in hier ein zusätzliches Fahrzeug notwendig wird. Dies gilt sowohl für Batteriebusse mit Brennstoffzellen Range-Extender als auch für Brennstoffzellenhybridbusse. Insbesondere der Nachtverkehr (Linienbetrieb ab 22 Uhr) kann durch einen

Brennstoffzellenbus nicht mehr erbracht werden, sodass für die letzten Betriebsstunden ein zusätzliches Fahrzeug benötigt werden würde.

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der technischen und betrieblichen Analyse der Linie 1A zeigen klar die unterschiedliche Eignung der einzelnen Antriebskonzepte. Trotz einer sehr moderaten täglichen Fahrleistung pro Fahrzeug, erhöht sich für die Elektrobuskonzepte der Fahrzeugbedarf gegenüber dem Dieseldienstbetrieb. Durch das notwendige Nachladen bzw. -tanken erhöhen sich die Leerkilometer bei den betrachteten alternativen Antrieben zwischen 50 % und 200 % (siehe Tabelle 6).

Antriebskonzept	Fahrzeugbedarf	Leerkilometer [km]
Diesel	1	8
Gasbus	1	12 (+50 %)
Brennstoffzellenhybridbus	2	21 (+162 %)
Batteriebus mit BZ-Range-Extender	2	21 (+162 %)
Batteriebus 1 [ElHe]	2	24 (+200 %)
Batteriebus 2 [ElHe]	2	24 (+200 %)
Batteriebus 1 [HyHe]	2	18 (+125 %)
Batteriebus 2 [HyHe]	2	13 (+63 %)

Tabelle 6: Fahrzeugbedarf für die Fahrleistung der Linie 1A (ohne Reserve)

2.2.2 Ergebnisse Linien 1B, 2, 3, 4 und 5 (Solobusse)

Die Analyse des Solobuseinsatzes auf den Linien 1B, 2, 3, 4 und 5⁶ erfolgte linienübergreifend in einem gemeinsamen Szenario. Im Dieseldienstbetrieb werden hierfür 12 Fahrzeuge benötigt. Die durchschnittliche Fahrleistung jedes Fahrzeugs beträgt im Liniendienst ca. 226 km. Hinzu kommen Leerfahrten von ca. 10 km. Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt im Liniendienst ungefähr 21 km/h.

⁶ Bei dieser Betrachtung wird unterstellt, dass zukünftig die Linie 4 ebenfalls elektrifiziert werden kann.

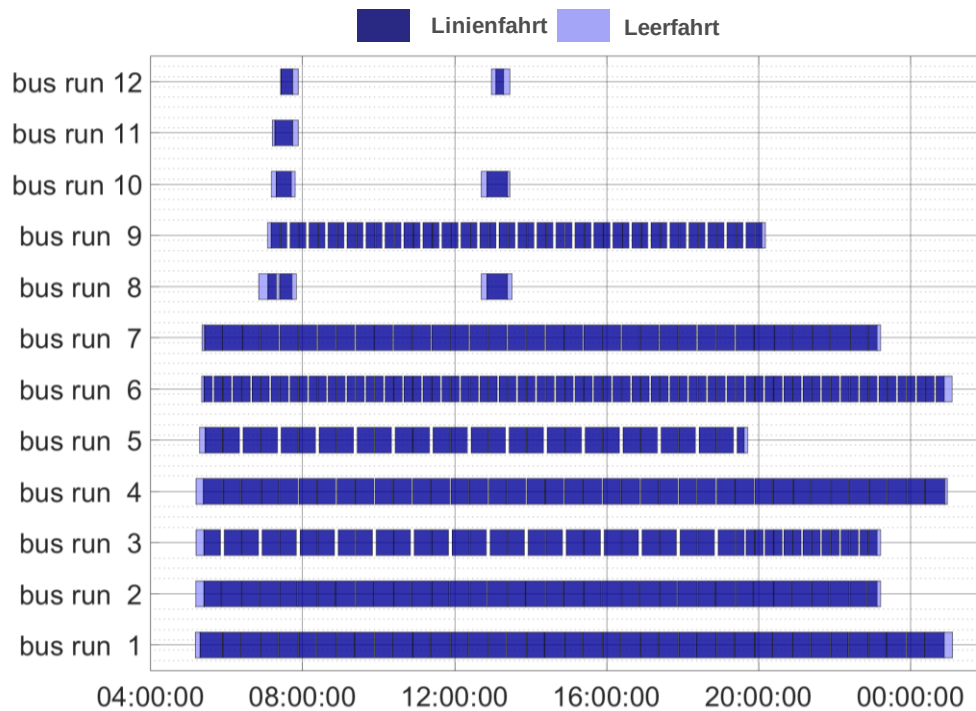


Abbildung 18: Dieselbuseinsatz (inkl. zukünftiger Fahrplananpassungen) der Linien 1B, 2, 3, 4 und 5. Entspricht auch dem Einsatz von Gasbussen

Die in Abbildung 18 gezeigte Einsatzplanung der Dieselbusse entspricht ebenfalls der Umlaufplanung bei einem Einsatz von Gasbussen. In dunkelblau werden die Linienfahrten und in hellblau die Leerfahrten dargestellt. Die als „bus run 1“ bis „bus run 12“ dargestellten Zeilen bezeichnen die Fahrzeugumläufe der einzelnen Dieselfahrzeuge. Die Nummern 8, 10, 11 und 12 zeigen das Fahrprofil der Busse, die für den Schülerverkehr eingesetzt werden. Fahrzeugreserven werden in der Abbildung nicht dargestellt.

Batteriebusse

Aufgrund der Reichweitenbeschränkung der Batteriebusse sind betriebliche Anpassungen erforderlich, die zu einem Fahrzeugmehrbedarf und zusätzlichen Leerkilometern aufgrund der notwendigen Ladephasen auf dem Betriebshof führen können. Exemplarisch sind nachfolgend die Ergebnisse der betrieblichen Anpassungen für die Linien 1B, 2, 3, 4 und 5 für den Batteriebus mit großer Batterie und Hybridheizung sowie vollelektrischer Heizung dargestellt.

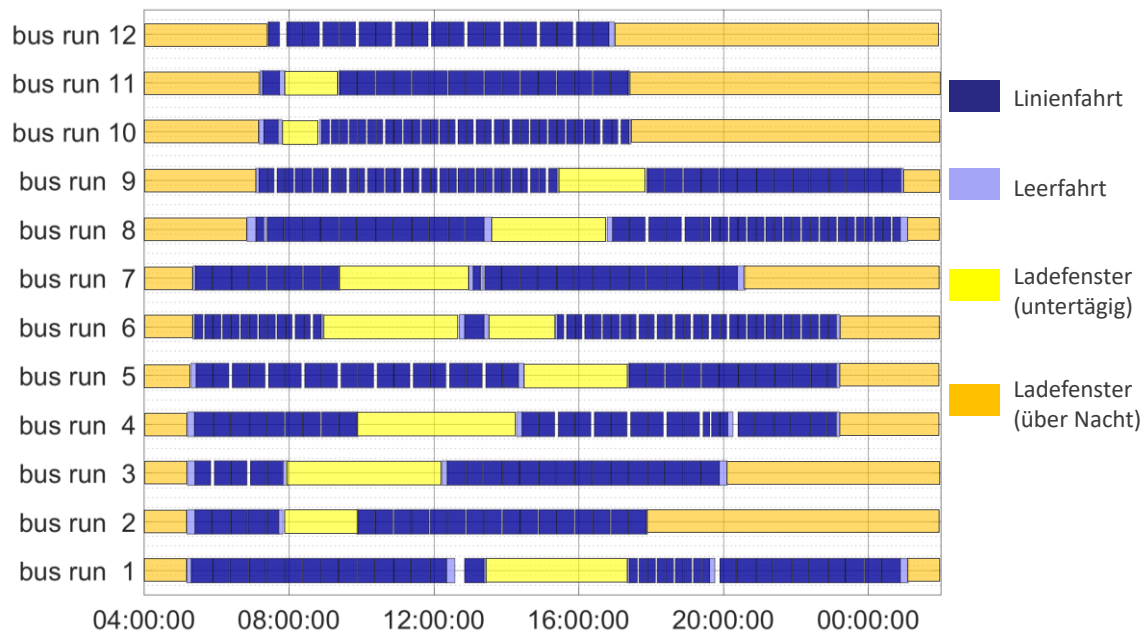


Abbildung 19: Einsatz von Batteriebus Typ 2 mit Hybridheizung auf den Linien 1B, 2, 3, 4 und 5

Abbildung 19 zeigt, dass die gesamte Fahrleistung auch von Batteriebussen ohne zusätzliche Fahrzeuge erbracht werden kann, sofern eine Hybridheizung (HyHe) mit geringem Nebenverbrauch genutzt wird. Die Fahrzeuge, die im Dieselsbusbetrieb ausschließlich für den Schülerverkehr genutzt werden, sind hier jedoch stärker eingebunden, da die untertägigen (gelb gekennzeichnet) stattfindenden Ladephasen der anderen Fahrzeuge kompensiert werden müssen. Wenn jedoch statt der Hybridheizung eine vollelektrische Heizung zum Einsatz kommt, erhöht sich der Fahrzeugbedarf um einen Bus. Der erhöhte Nebenverbrauch reduziert die Reichweite und erfordert zusätzliche untertägige Ladephasen (siehe Abbildung 20).

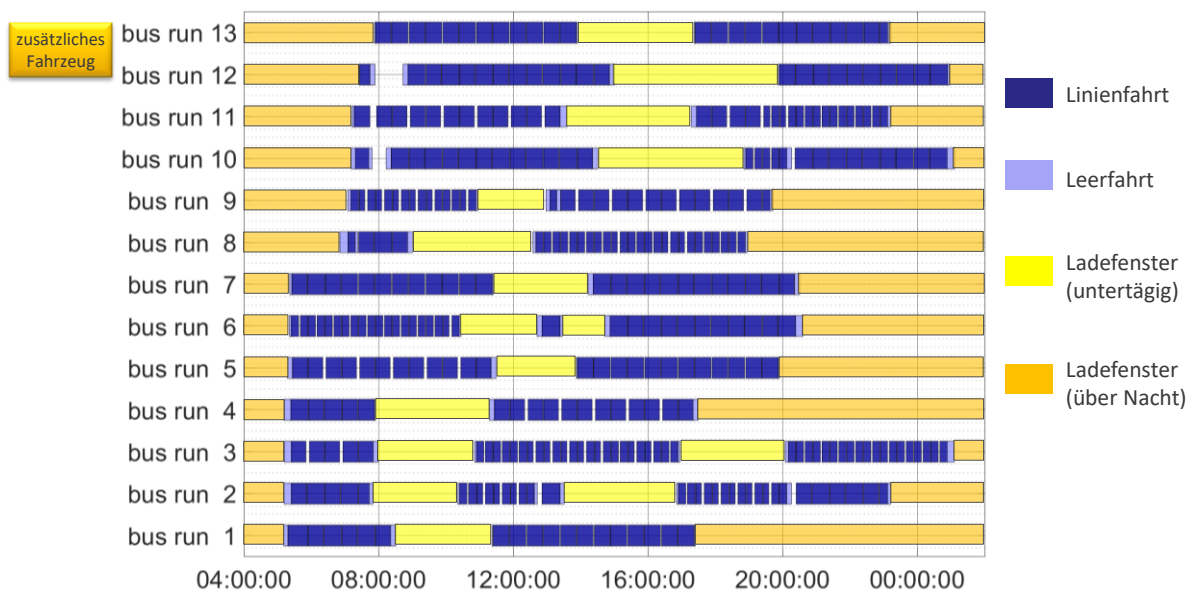


Abbildung 20: Einsatz von Batteriebus Typ 2 mit vollelektrischer Heizung auf den Linien 1B, 2, 3, 4 und 5

Brennstoffzellenbusse

Brennstoffzellenbusse verfügen im Gegensatz zu Batteriebussen über höhere Reichweiten und sind somit betrieblich vorteilhaft. Für die fünf betrachteten Solobus-Linien sind keine zusätzlichen Fahrzeuge gegenüber dem Dieseleinsatz notwendig, jedoch ist eine angepasste Verteilung der Fahrleistung auf die Fahrzeuge erforderlich. Die Umlaufanpassungen für einen Betrieb mit Brennstoffzellenhybridbussen sind in Abbildung 21 dargestellt.

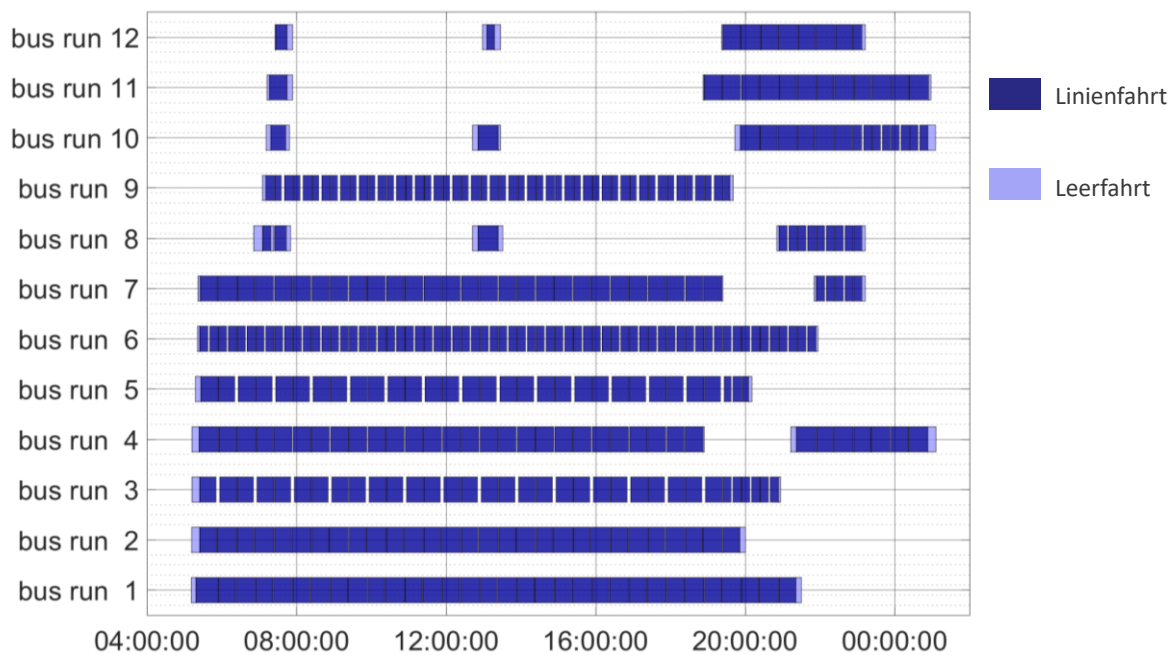


Abbildung 21: Einsatz vom Brennstoffzellenhybridbus auf den Linien 1B, 2, 3, 4 und 5

In Tabelle 7 ist eine Übersicht des Fahrzeugbedarfs und der Leerkilometer für alle betrachteten Antriebskonzepte aufgeführt.

Antriebskonzept	Fahrzeugbedarf	Leerkilometer [km]
Diesel	12	123
Gasbus	12	171 (+39 %)
Brennstoffzellenhybridbus	12	204 (+66 %)
Batteriebus mit BZ-Range-Extender	12	204 (+66 %)
Batteriebus 1 [ElHe]	15	309 (+151 %)
Batteriebus 2 [ElHe]	13	236 (+92 %)
Batteriebus 1 [HyHe]	12	245 (+99 %)
Batteriebus 2 [HyHe]	12	183 (+49 %)

Tabelle 7: Fahrzeugbedarf für die Fahrleistung der Linien 1B, 2, 3, 4 und 5 (ohne Reserve)

2.2.3 Ergebnisse Linien 1B, 2, 3 und 5 (Solobusse)

Aufgrund der in Kapitel 1.6 beschriebenen Höhenbegrenzung auf der Linie 4, wurde die Fahrleistung dieser Linie bei der folgenden Betrachtung ausgeklammert und ein linienübergreifendes Szenario mit der Fahrleistung der Linien 1B, 2, 3 und 5 betrachtet. Die durchschnittliche Fahrleistung im Linieneinsatz eines Busses ergibt sich zu 210 km. Die Durchschnittsgeschwindigkeit erhöht sich leicht auf ca. 22,5 km/h. Die Leerfahrten bleiben mit 10 km im Durchschnitt gleich.

Das Ausklammern der Linie 4 führt dazu, dass der Fahrzeugbedarf im Dieselbusbetrieb auf 10 Busse reduziert wird. In Tabelle 8 ist zu erkennen, dass unabhängig von der betrachteten Technologie (Batteriebus, Brennstoffzellenbusse, Gasbus) keine zusätzlichen Fahrzeuge benötigt werden. Lediglich die Leerkilometer beim Einsatz der unterschiedlichen Fahrzeugkonfigurationen unterscheidet sich. Insbesondere beim Batteriebus Typ 1 mit vollelektrischer Heizung ergibt sich nahezu eine Verdopplung. Durch betriebliche Anpassungen können die notwendigen Ladephasen und die dafür erforderlichen Leerfahrten zeitlich so kompensiert werden, dass kein zusätzliches Fahrzeug eingesetzt werden muss (siehe Abbildung 22).

Antriebskonzept	Fahrzeugbedarf	Leerkilometer [km]
Diesel	10	102
Gasbus	10	142 (+39 %)
Brennstoffzellenhybridbus	10	152 (+49 %)
Batteriebus mit BZ-Range-Extender	10	152 (+49 %)
Batteriebus 1 [ElHe]	10	197 (+93 %)
Batteriebus 2 [ElHe]	10	154 (+51 %)
Batteriebus 1 [HyHe]	10	155 (+52 %)
Batteriebus 2 [HyHe]	10	131 (+28 %)

Tabelle 8: Fahrzeugbedarf für die Fahrleistung der Linien 1B, 2, 3 und 5 (ohne Reserve)

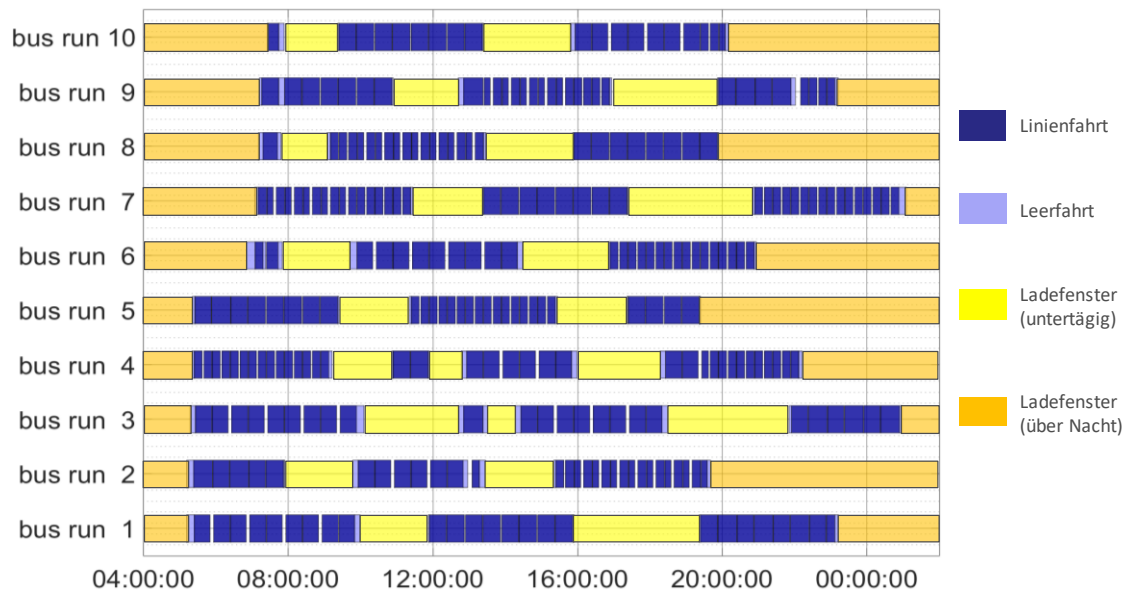


Abbildung 22: Einsatz von Batteriebus Typ 1 mit vollelektrischer Heizung auf den Linien 1B, 2, 3 und 5

Teilweise ist eine große Differenz des Fahrzeugmehrbedarfs gegenüber den Detailergebnissen der Variante mit Linie 4 zu erkennen. Ursächlich hierfür ist das Verhältnis der Schülerverkehrslinien zu den Hauptlinien (eine Hauptlinie weniger), sodass die Umplanung der im Schülerverkehr eher gering ausgelasteten Fahrzeuge ausreicht, um die geringeren Reichweiten zu kompensieren.

2.3 Ergebnisübersicht und Diskussion

Die vorgestellten Betriebskonzepte wurden hinsichtlich Fahrzeugbedarf, Leerkilometer und Fahrerzeit bewertet. Als Referenz wurde der Dieselbusbetrieb herangezogen, der die Untergrenze bezüglich der Fahrzeuganzahl definiert.

In Tabelle 9 sind die Fahrzeugbedarfe für den Linienbetrieb abgebildet (Reservefahrzeuge werden hierbei nicht berücksichtigt). Der Fahrzeugmehrbedarf ist farblich hervorgehoben. Konzepte ohne zusätzliche Fahrzeuge im Vergleich zum Dieselbusbetrieb sind grün markiert, Konzepte mit bis zu zwei zusätzlichen Fahrzeugen gelb und Linien mit drei und mehr zusätzlichen Fahrzeugen rot.

Die Ergebnisse lassen sich anhand der getroffenen technischen Annahmen gut plausibilisieren. Batteriebus Typ 1 ist mit der kleinsten Batterie ausgestattet. Der Fahrzeugmehrbedarf ist für diesen Bustyp daher im Vergleich am höchsten, da die Reichweite geringer ist als bei batteriebus Typ 2. Weiterhin wird der Einfluss der Nebenverbraucherkonfigurationen deutlich. Batteriebuskonzepte mit vollelektrischer Heizung (ElHe) erfordern zusätzliche Fahrzeuge im Vergleich zu Konzepten, bei denen eine Hybridheizung (HyHe) eingesetzt wird. Dies lässt sich durch den höheren Energiebedarf erklären.

Fahrleistung	Gefäßgröße	Diesel-Referenz	Batteriebus Typ 1		Batteriebus Typ 2		BZ-RE	BZ-Hybrid	Gasbus
			ElHe	HyHe	ElHe	HyHe	ElHe	ElHe	-
1A	Midibus	1	2	2	2	2	2	2	1
1B, 2, 3, 4, 5	Solobus	12	15	12	13	12	12	12	12
1B, 2, 3, 5	Solobus	10	10	10	10	10	10	10	10

Tabelle 9: Fahrzeugbedarf aller Fahrleistungsszenarien ohne Reserve

Der geringe Fahrzeugmehrbedarf bei Einsatz von Brennstoffzellenbussen zeigt die betrieblichen Vorteile dieser technischen Lösung. Die Solobuslinien können ohne Zusatzfahrzeuge betrieben werden. Die Nutzung der Abwärme der Brennstoffzellen zum Heizen des Innenraums ermöglicht es, auf eine elektrische Zusatzheizung zurückzugreifen, sodass der Betrieb auch im Winter lokal vollständig emissionsfrei erfolgt. Im Vergleich zu Batteriebussen mit vollelektrischer Heizung werden hierbei weniger Fahrzeuge notwendig. Erst bei Einsatz eines Kraftstoffzusatzheizers gleichen sich die Fahrzeugbedarfe an. Jedoch sind Batteriebusse mit Hybridheizung nicht 100 % lokal emissionsfrei (vgl. AP 3).

Zusammenfassend lässt sich für das AP 2 festhalten, dass eine Umstellung auf alternative Antriebstechnologien möglich ist. Für den Solobusbetrieb (Linie 1B, 2, 3, 4 und 5) sind jedoch bei dem Einsatz von Batteriebussen erhöhte betriebliche Anpassungen erforderlich. Bei der Verwendung einer vollelektrischen Heizung steigt zudem der Fahrzeugbedarf an. Brennstoffzellenbusse und Gasbusse sind aus betrieblicher Sicht vorteilhafter.

3. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Quantifizierung der Umweltwirkungen (AP 3)

In den vorhergehenden Arbeitspaketen wurden die technischen und betrieblichen Konsequenzen des Einsatzes der unterschiedlichen Antriebstechnologiekonzepte analysiert. Welches Konzept zu bevorzugen ist, lässt sich jedoch erst mit Hilfe einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und einer Quantifizierung der Umweltwirkung ermitteln. Beides erfolgte im Arbeitspaket AP 3 der Studie.

3.1 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Auf Basis der Ergebnisse der technischen und betrieblichen Analyse wurden für jedes Einsatzkonzept die Total Costs of Ownership (TCO) bestimmt. Die TCO umfassen alle Kosten, die während des gesamten Betrachtungszeitraums anfallen. Neben den Anfangsinvestitionen sind somit auch Ausgaben für Ersatzbeschaffungen von Batterien und Brennstoffzellen sowie Energiekosten und Instandhaltungsausgaben enthalten. Eine weitere Komponente sind die zusätzlichen Fahrerkosten, welche aus der Anpassung des Betriebsmodells gegenüber dem Dieselseinsatz resultieren. Abbildung 23 zeigt eine Übersicht der einzelnen Kostenkomponenten.

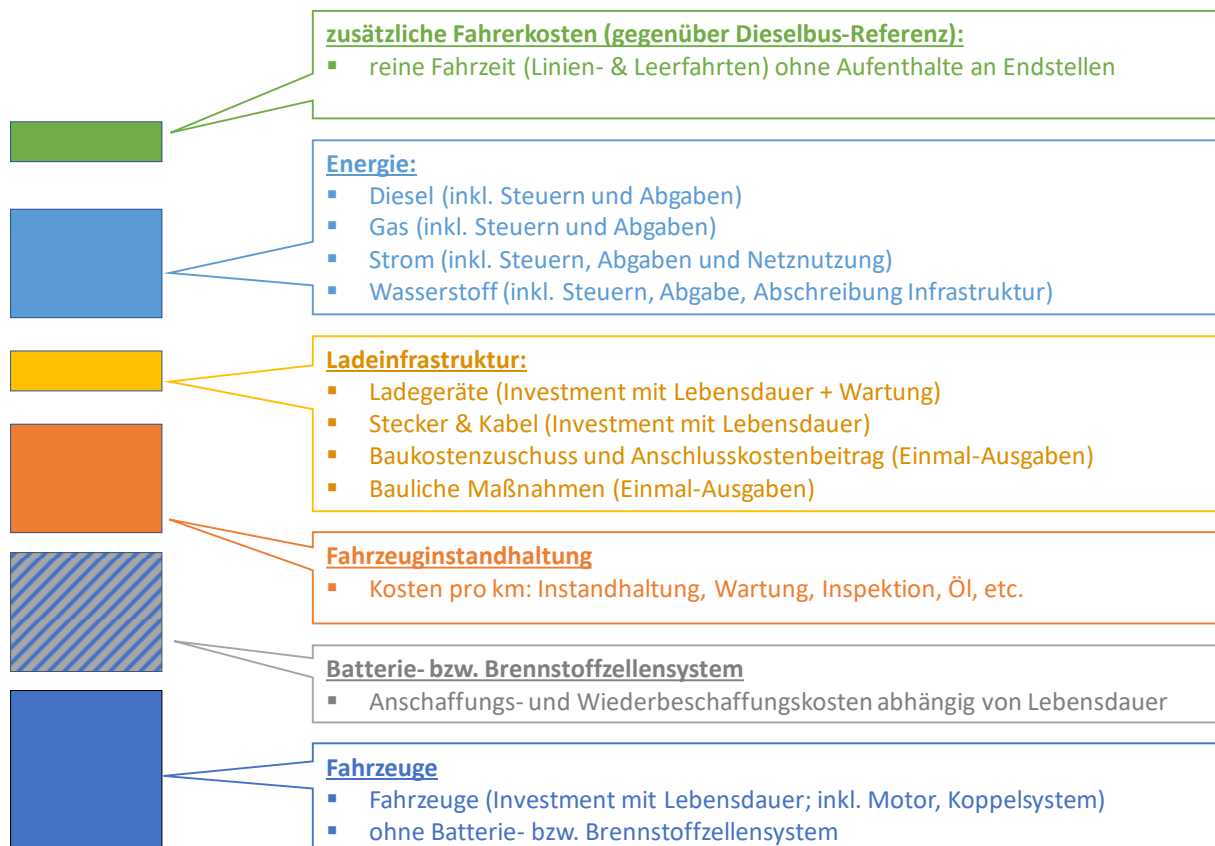


Abbildung 23: Aufschlüsselung der betrachteten Kostenanteile

Die TCO für Midi- und Solobusse wurde für eine Elektrifizierung im zeitlichen Nahbereich (bis zum Jahr 2024) ermittelt. Miteinbezogen wurden die in Kapitel 1.5.6 benannten Fördermöglichkeiten. Das dargestellte Szenario „ohne BMU-Förderung“ beschreibt dabei den Fall, dass nur die reguläre Förderung des Freistaats Bayern genutzt wird und keine Förderung durch das Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) erfolgt. In dem Szenario „mit BMU-Förderung“ wird zusätzlich die maximale Förderung des BMU einkalkuliert. Darüber hinaus sind in den Lebenszykluskosten Fahrzeugreserven und Redundanzen der Ladeinfrastruktur inkludiert. Dabei gilt, dass sowohl für reine Batteriebusse als auch für Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender für jeweils zwei Fahrzeuge ein Ladegerät mit einer Ausgangsladeleistung von 150 kW eingerechnet wird.

3.1.1 Linie 1A (Midibusse)

Die TCO der einzelnen Umstellungsoptionen sind in Abbildung 24 für das Szenario ohne BMU-Förderung dargestellt. Es besteht ein deutlicher Unterschied zum Dieselbusbetrieb für alle Elektrobuskonzepte, da aufgrund des zusätzlichen Fahrzeugs ein enormer relativer Zuwachs entsteht. Neben diesem Effekt spielen die Kosten für die Batterie und Ladeinfrastruktur sowie für die zusätzliche Fahrzeit eine Rolle. Die günstigste Umstellungsoption für die Linie 1A wäre ein Betrieb mit Gasbussen, da hier keine zusätzlichen Fahrzeuge benötigt werden. Gegenüber dem Dieselbusbetrieb ergibt sich ein Mehraufwand von 0,35 €/km. Das kostengünstigste Elektrobuskonzept ist der Batteriebus Typ 1 mit Hybridheizung, welcher zu einem Aufpreis von 2,34 €/km realisiert werden kann.

Werden die maximalen Förderquoten des BMU berücksichtigt, ist der Batteriebus Typ 2 (225 kWh) mit Hybridheizung das kostengünstigste Elektrobuskonzept. Trotz Förderung verbleiben jedoch Mehrkosten in Höhe von 1,38 €/km im Vergleich zum Dieselbusbetrieb (siehe Abbildung 25).

In beiden Betrachtungen (ohne und mit BMU-Förderung) sind Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender mit 5,16 €/km bzw. 3,91 €/km sowie Brennstoffzellenhybridbusse mit 5,64 €/km bzw. 4,13 €/km die kostenintensivsten Alternativen. Dies liegt zum einen an den Kosten für die Brennstoffzellensysteme und zum anderen an den hohen Energiekosten durch die Nutzung von (grünem) Wasserstoff. Erst ab Wasserstoffkosten von ca. 4-5 €/kg sind Konzepte mit Brennstoffzellenbussen auf vergleichbarem Niveau wie die betrachteten Batteriebuskonzepte.

Linie 1A - Annuitäten (€ pro Nutzkilometer)

Betrieb mit Midibus - Nutzkilometer pro Jahr: 54.949 km

ohne BMU-Förderung

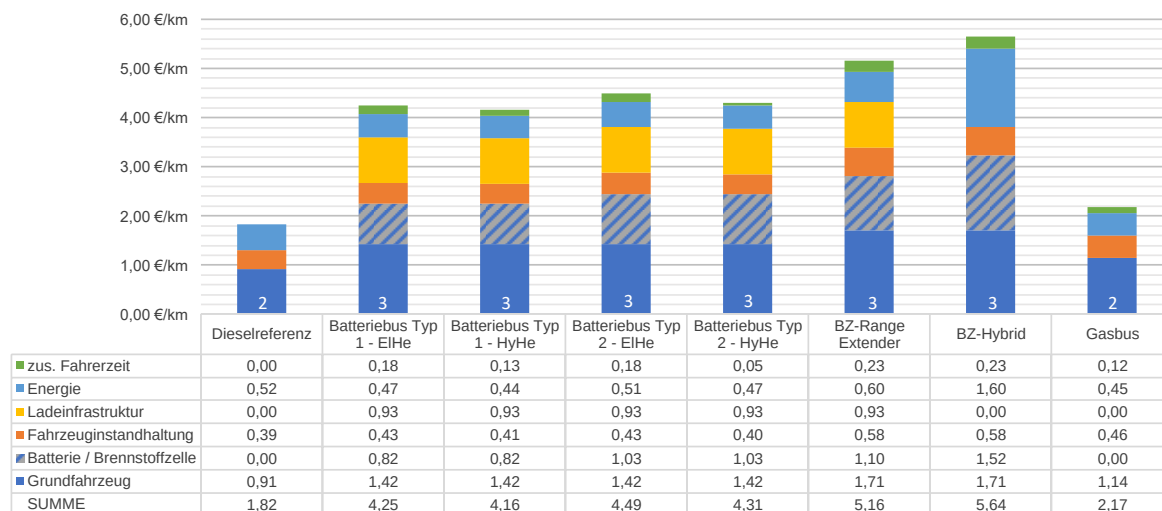


Abbildung 24: Linie 1A - Annuitäten in Euro pro Nutzkilometer (inkl. Reserve, mit Landesförderung aber ohne Förderung des BMU)

Linie 1A - Annuitäten (€ pro Nutzkilometer)

Betrieb mit Midibus - Nutzkilometer pro Jahr: 54.949 km

mit BMU-Förderung

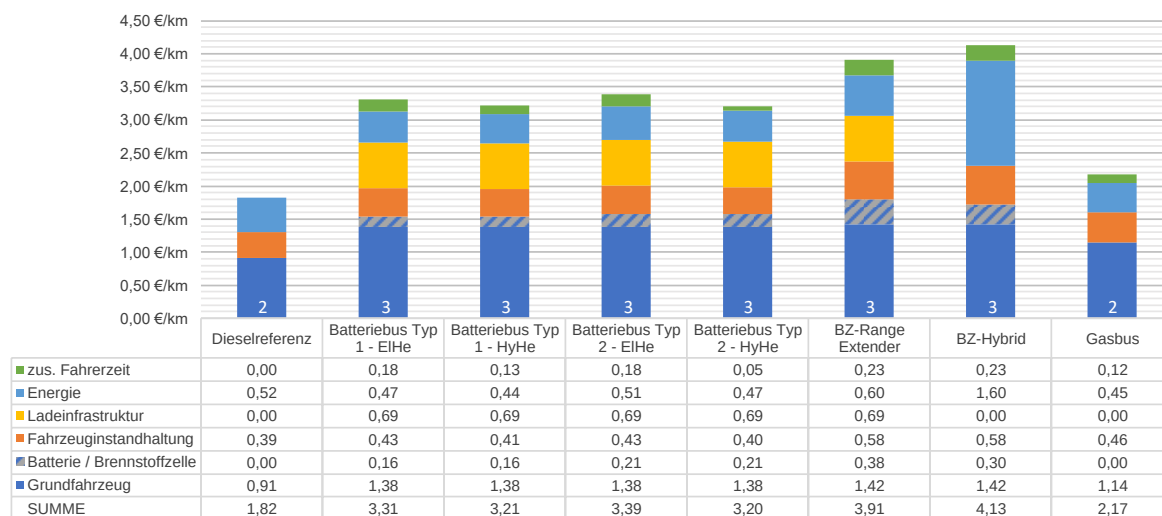


Abbildung 25: Linie 1A - Annuitäten in Euro pro Nutzkilometer (inkl. Reserven, mit Landes- und Bundesförderung)

3.1.2 Linien 1B, 2, 3, 4 und 5 (Solobusse)

Im Dieselmotrieb werden 12 Solobusse auf den Linien 1B, 2, 3, 4 und 5 eingesetzt. Im Rahmen von AP 2 wurde ermittelt, dass die Batteriebusse mit vollelektrischer Heizung gegenüber dem Dieselmotrieb drei (Typ 1) bzw. ein (Typ 2) zusätzliches Fahrzeug erfordern. Alle anderen

alternativen Antriebskonzepte und Nebenverbraucherkonfiguration verursachen keinen Fahrzeugmehrbedarf (siehe Kapitel 2.2.2). In den TCO wurden darüber hinaus für alle Konzepte zwei zusätzliche Fahrzeuge als Reserve inkludiert.

Wie in Abbildung 26 zu sehen ist, ist die kostengünstigste Option (ohne Berücksichtigung der Förderung des BMU) für die Elektrifizierung der fünf Linien das Konzept des Batteriebus Typ 1 (250 kWh) mit Hybridheizung mit einem Wert von 1,99 €/km. Die Fahrleistung kann, durch die im Vergleich zum Batteriebus Typ 2 kleinere Batterie sowie dem geringeren Nebenverbrauch der Hybridheizung gegenüber der vollelektrischen Heizung, günstig erbracht werden. Jedoch gilt auch hier, dass der Dieselbusbetrieb die insgesamt günstigste Alternative ist. Die Differenz pro Kilometer beträgt 0,63 €. Im Vergleich der alternativen Antriebstechnologien ist auch hier der Betrieb mit Gasbussen kostengünstiger als eine Elektrifizierung des Fahrbetriebs. Die Mehrkosten betragen pro Nutzkilometer ca. 0,10 € im Vergleich zum Dieselbusbetrieb, bei Gesamtkosten von 1,46 €/km.

Unter Berücksichtigung einer Förderung durch das BMU ist das kostengünstigste Elektrobuskonzept der Batteriebus Typ 2 (350 kWh) mit Hybridheizung. Die Kosten pro Nutzkilometer belaufen sich dabei auf 1,55 €/km. In Abbildung 29 sind die Kosten der einzelnen Elektrifizierungskonzepte inkl. Bundesförderung graphisch dargestellt. Vergleichbar zu den Lebenszykluskosten der Midibusse schneiden sowohl das Konzept mit Batteriebussen und Brennstoffzellen-Range-Extender als auch das Konzept mit Brennstoffzellenhybridbussen in beiden Betrachtungen (ohne und mit Bundesförderung) am kostenintensivsten ab.

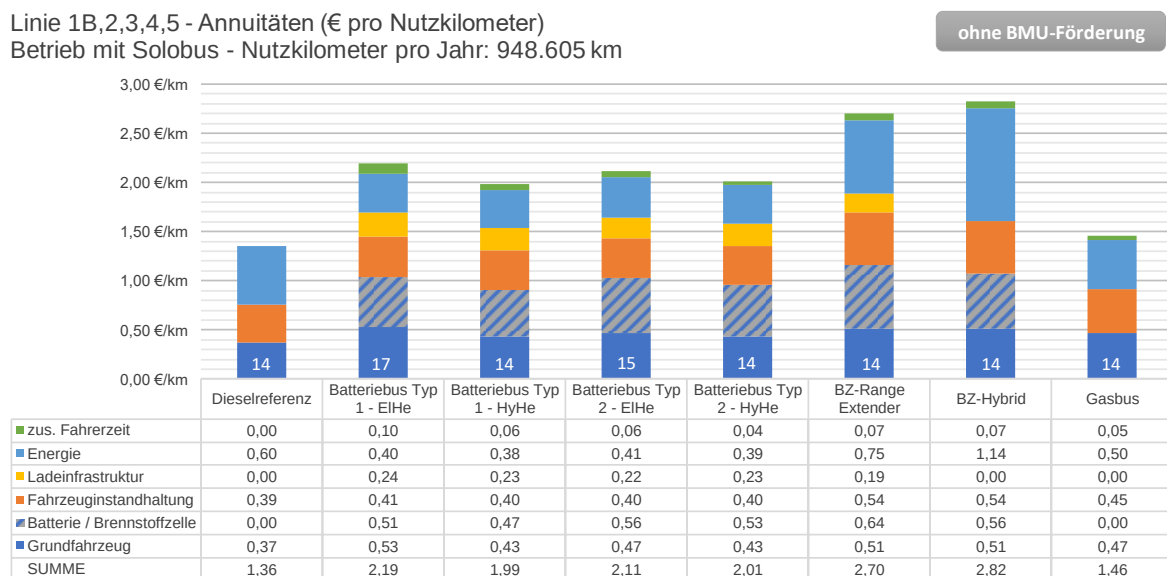


Abbildung 26: Fahrleistungen der Linien 1B, 2, 3, 4 und 5 - Annuitäten in Euro pro Nutzkilometer (inkl. Reserve, mit Landesförderung aber ohne Förderung des BMU)

Linie 1B,2,3,4,5 - Annuitäten (€ pro Nutzkilometer)

Betrieb mit Solobus - Nutzkilometer pro Jahr: 948.605 km

mit BMU-Förderung

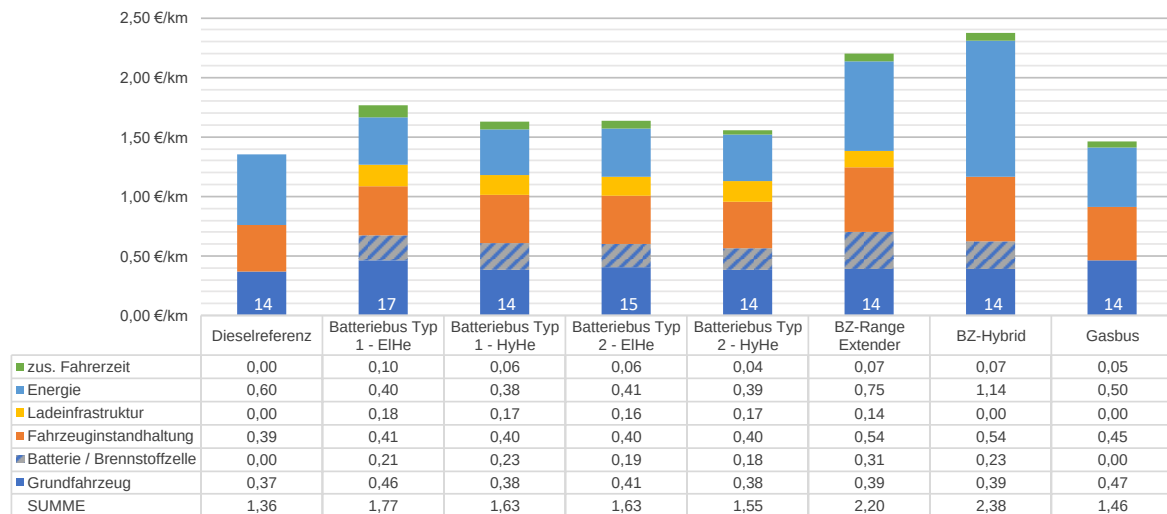


Abbildung 27: Fahrleistungen der Linien 1B, 2, 3, 4 und 5 - Annuitäten in Euro pro Nutzkilometer (inkl. Reserven, mit Landes- und Bundesförderung)

3.1.3 Linien 1B, 2, 3 und 5 (Solobusse)

Der Methodik der Studie folgend wurde auch für das Umstellungsszenario ohne die Linie 4 eine Kostenrechnung erstellt. In der Kostenrechnung werden ebenfalls, zuzüglich zu den Fahrzeugen, die für den Linienbetrieb notwendig sind, zwei Reservefahrzeuge berücksichtigt.

Der Hauptunterschied zur zuvor diskutierten Variante besteht darin, dass für jedes betrachtete Konzept kein Fahrzeugmehrbedarf gegenüber dem Dieselsbusbetrieb entsteht (siehe Kapitel 2.2.3). Vergleichbar zu den Lebenszykluskosten der Fahrleistung aus Kapitel 3.1.2 ist in diesem Szenario der Batteriebus Typ 1 (250 kWh) mit Hybridheizung (2,03 €/km) das kostengünstigste Elektrobuskonzept ohne Berücksichtigung der BMU-Förderung (siehe Abbildung 28). Im Vergleich zu einem vollständigen Betrieb mit Dieselsbussen beziffern sich die Mehrkosten auf 0,61 € pro Linienkilometer.

Unter Berücksichtigung einer potentiellen Förderung des BMU ist der Batteriebus Typ 2 (350 kWh) mit Hybridheizung (1,51 €/km) am kostengünstigsten (siehe Abbildung 29). Die Mehrkosten zum Dieselsbus sind hier lediglich 0,09 €/km. Aufgrund der reduzierten Fahrleistung sowie den hohen Förderquoten des BMU ist für diesen Fall der Betrieb mit Batteriebusen ebenfalls kostengünstiger als der Betrieb mit Gasbussen (1,55 €/km). Durch die geringere Fahrleistung werden die Batteriebusse weniger beansprucht, wodurch der Energiedurchsatz durch die Batteriesysteme der Fahrzeuge kleiner ist. Daraus folgt, dass die Batteriesysteme im Betrachtungszeitraum länger halten und so weniger Batterien neu beschafft werden müssen.

Linie 1B,2,3,5 - Annuitäten (€ pro Nutzkilometer)

Betrieb mit Solobus - Nutzkilometer pro Jahr: 700.892 km

ohne BMU-Förderung

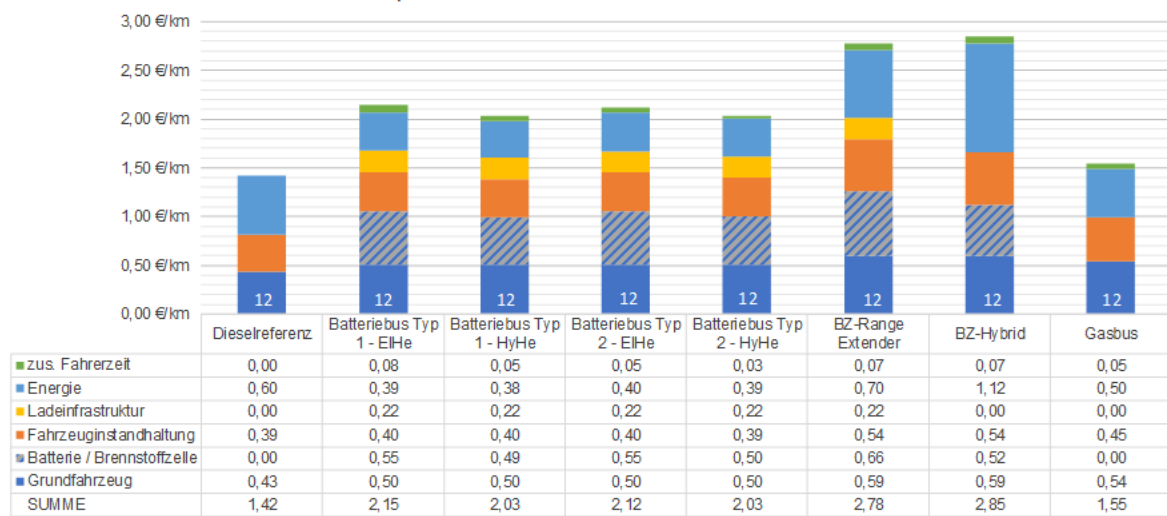


Abbildung 28: Fahrleistungen der Linien 1B, 2, 3 und 5 - Annuitäten in Euro pro Nutzkilometer (inkl. Reserve, mit Landesförderung aber ohne Förderung des BMU)

Linie 1B,2,3,5 - Annuitäten (€ pro Nutzkilometer)

Betrieb mit Solobus - Nutzkilometer pro Jahr: 700.892 km

mit BMU-Förderung

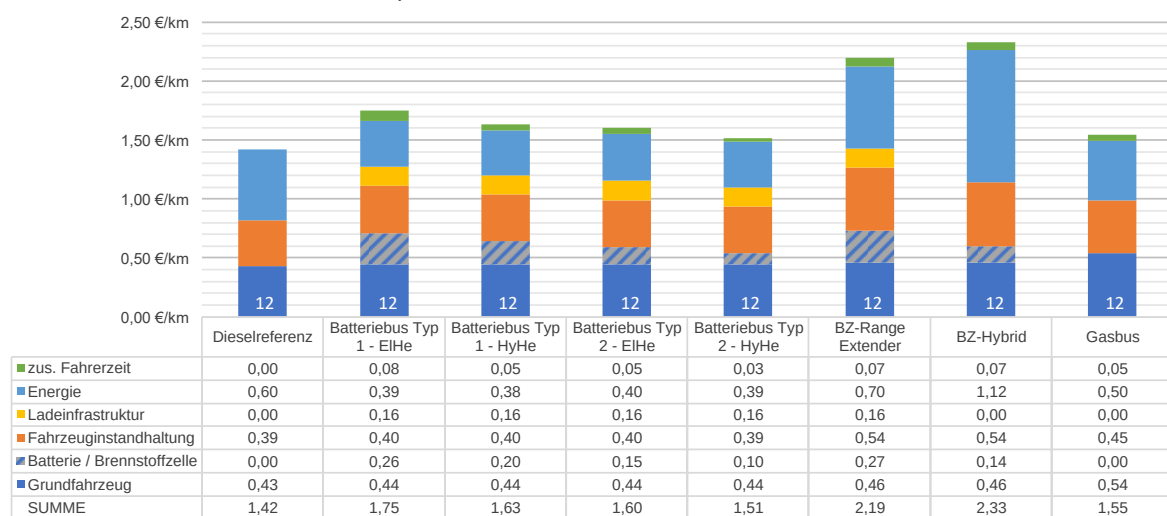


Abbildung 29: Fahrleistungen der Linien 1B, 2, 3 und 5 - Annuitäten in Euro pro Nutzkilometer (inkl. Reserven, mit Landes- und Bundesförderung)

3.1.4 Zwischenfazit

Als Fazit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in AP 3 ist festzuhalten, dass der Dieselbusbetrieb immer die kostengünstigste Variante ist. Im Vergleich der alternativen Antriebskonzepte sind Gasbusse kostengünstiger als reine Elektrobusslösungen (Konzepte mit Batterie- oder Brennstoffzellenbussen). Vergleicht man dahingegen die Mehrkosten für den Einsatz von Elektrobussen untereinander, ist zu erkennen, dass diese deutlich zwischen den Konzepten variieren. So zeigte sich, dass der Betrieb mit Batteriebussen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Brennstoffzellensystem kostengünstiger ist. Die großen Unterschiede zwischen Batterie- und Brennstoffzellenbusse sind insbesondere in den Energiekosten begründet. Für die Studie wurde unterstellt, dass Brennstoffzellenfahrzeuge mit „grünem Wasserstoff“ betrieben werden (vgl. Kapitel 1.5.3). Hierbei sind die Kosten jedoch sehr hoch. Erst bei einer Halbierung der Wasserstoffkosten auf ca. 4-5 €/kg sind Brennstoffzellenfahrzeuge auf vergleichbarem Kostenniveau wie Batteriebusse. Sogenannter „grauer Wasserstoff“ wäre zwar günstiger und würde lokal zu weniger Feinstaub- und Stickoxid-Emissionen führen, jedoch wäre die CO₂-Bilanz deutlich schlechter und auf vergleichbarem Niveau wie bei einer Verbrennung des fossilen Energieträgers.

Der Vergleich der Batteriebuskonzepte untereinander zeigt, dass durch den Einsatz von Hybridheizungen weitere Kosten gespart werden können. Dabei müssen die Ergebnisse im Zusammenhang mit den Erkenntnissen aus AP 1 und AP 2 bewertet werden. Der Fahrzeugbedarf jeder Linie basiert, neben dem linienspezifischen Energiebedarf zur Traktion, ebenfalls auf dem Verbrauch der Nebenaggregate, insbesondere dem System zur Heizung, Lüftung und Klimatisierung. Die in Kapitel 1.2.2 dargestellten Szenarien haben verdeutlicht, dass der Worst-Case für eine vollelektrische Heizung energieintensiver ist als für eine Hybridheizung. Da die Anzahl der benötigten Fahrzeuge auf Basis des Energiebedarfs im Worst-Case ausgelegt wird, ist der Fahrzeugmehrbedarf in der Konfiguration mit vollelektrischer Heizung in der Regel höher. Dies führt somit zusätzlich zu höheren Gesamtkosten.

Im Allgemeinen hat die Wirtschaftlichkeitsrechnung gezeigt, dass eine Elektrifizierung immer mit Mehrkosten verbunden ist. Die höheren Anschaffungskosten der Elektrofahrzeuge sowie die Infrastrukturinvestitionen können nicht durch geringere betriebliche Kosten kompensiert werden. Unter Berücksichtigung einer Bundesförderung des BMU belaufen sich die Mehrkosten der kostengünstigsten Elektrobusskonzepte auf ca. 20 - 30 % gegenüber dem Dieselbusbetrieb. Falls eine Bundesförderung nicht möglich ist und nur eine Förderung durch das Land Bayern erfolgt, steigen die Mehrkosten auf über 50 % gegenüber dem Dieselbusbetrieb.

3.2 Umweltauswirkungen

Neben den betrieblichen und wirtschaftlichen Konsequenzen wurden weiterhin die Umwelteinflüsse der verschiedenen Antriebstechnologien und Konfigurationen quantifiziert und mit der Diesel-Referenz verglichen. Nachfolgend ist die Methodik zur Bestimmung der Umweltauswirkungen erläutert.

3.2.1 Annahmen für die Emissionsberechnung

Die Emissionen eines Busbetriebs können in global und lokal wirksame Emissionen unterschieden werden. Als global wirksame Emissionen sind insbesondere Treibhausgasemissionen (CO₂) zu nennen, welche zum einen während des Betriebs und zum anderen bei der Energieträgerbereitstellung emittiert werden.⁷ Als lokal wirksame Emissionen sind Stickoxide (NO_x) und Feinstaub (Particulate Matter, PM) von Relevanz, die aus der Verbrennung von Kraftstoff resultieren.⁸ Als Referenz für die Bewertung der Umweltauswirkung wird der Betrieb von Dieselnbussen mit EURO VI Norm herangezogen.

In Tabelle 10 sind die durchschnittlichen (globalen und lokalen) Emissionen von Diesel-, Gas- und Elektrobussen pro Kilometer aufgeführt. Die Werte basieren auf dem „Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ sowie auf einer Veröffentlichung des Umweltbundesamts [5]. Die Emissionen des Kraftstoffzusatzheizers sind in den Werten nicht enthalten.

	Dieselbus EURO VI		Gasbus EURO VI mit Biomethan		Elektrobus
	Midibus	Solobus	Midibus	Solobus	Midi-/Solobus
CO ₂ -Emissionen	1,08 kg/km	1,24 kg/km	0,12 kg/km	0,14 kg/km	0 kg/km
NO _x -Emissionen	0,31 g/km	0,35 g/km	0,4 g/km	0,5 g/km	0 g/km
PM-Emissionen	0,02 g/km	0,02 g/km	0,006 g/km	0,007 g/km	0 g/km

Tabelle 10: Faktoren für globale wirksames CO₂ und lokale wirksamen NO_x- und PM-Emissionen [5]

Der Einsatz des Kraftstoffzusatzheizers bei einer Hybridheizung führt bei den Batteriebusen zu globalen und lokalen Emissionen durch die Verbrennung von Kraftstoff. Der Kraftstoffzusatzheizer wird in der Regel jedoch erst bei Temperaturen unter 4 °C zugeschaltet. Bei Temperaturen über 4 °C steht hingegen zum Heizen des Fahrgastraums die elektrisch versorgte Wärmepumpe zur Verfügung. In Abbildung 30 ist das Temperaturprofil der Stadt Lindau zwischen 5:00 Uhr und 24:00 Uhr dargestellt, welches für die Berechnung der Emissionen der

⁷ Die Herstellung und Entsorgung von Fahrzeugen, Werkzeug, etc. wird hier vernachlässigt.

⁸ Feinstaub-Emissionen entstehen auch durch Bremsabrieb und Aufwirbelung von Straßenstaub. Jedoch werden diese nicht betrachtet, da sie schwer zu quantifizieren und zu vermeiden sind und i.d.R. größere Partikelgrößen aufweisen (weniger lungengängig). Elektrobusse hätten im Vergleich leichte Vorteile, da diese einen geringeren Bremsverschleiß durch die Möglichkeit des regenerativen Bremsens haben.

Hybridheizung herangezogen wurde. Für die Emissionsberechnung wurde die Annahme getroffen, dass der Kraftstoffzusatzheizung mit Diesel betrieben wird. Die NO_x-Emissionen von 0,962 g pro Liter Diesel und PM-Emissionen von 0,288 g pro Liter Diesel ergeben sich aus Messungen, die in einer Studie zur Reduzierung der Abgasemissionen von Transportfahrzeugen ermittelt wurden [6]. Die Ausstoßmengen von rund 2,97 kg CO₂ pro Liter Diesel leiten sich aus den Annahmen für die global wirksamen Emissionen der Dieselerverbrennung inkl. Bereitstellung ab.

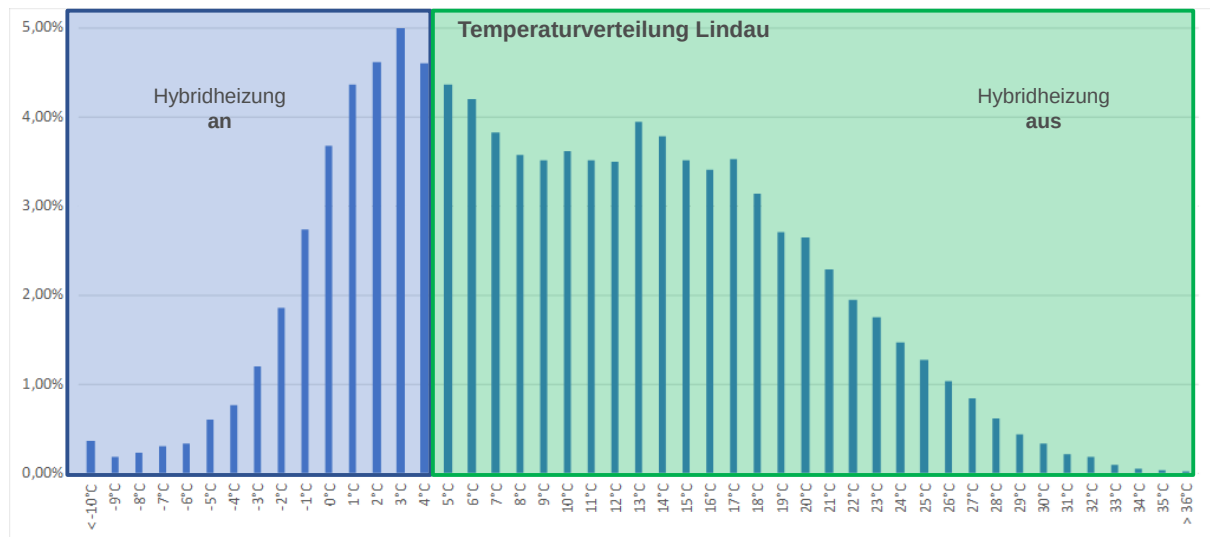


Abbildung 30: Temperaturprofil der Stadt Lindau zwischen 5:00 Uhr und 24:00 Uhr

3.2.2 Ergebnisse

Mit den oben beschriebenen Annahmen und den Einsatzszenarien, die in AP 2 ermittelt wurden, sind die Emissionen der Fahrzeuge berechnet worden. Exemplarisch sind die Ergebnisse für die Umstellung der Linien 1B, 2, 3, 4 und 5 auf einen Batterie-Solobusbetrieb sowie die relativen Einsparpotentiale gegenüber dem Dieseldisbusbetrieb in Abbildung 31 und in Tabelle 11 dargestellt (die Ergebnisse für die Linie 1A (Midibusbetrieb) und das Szenario ohne Linie 4 sind im Anhang zu finden).

Über alle Einsatzszenarien hinweg lässt sich festhalten, dass durch den Einsatz von Batteriebussen mit vollelektrischer Heizung sowie mit Brennstoffzellenbussen 100 % der Schadstoffemissionen im Vergleich zum Dieseldisbusbetrieb vermieden werden können. Für die Konzepte, in denen eine Hybridheizung zum Einsatz kommt, werden ebenfalls Emissionen reduziert, jedoch entstehen durch die Dieselerverbrennung weiterhin Schadstoffe. Allerdings sind insbesondere die CO₂- und NO_x-Emissionen minimal und eine Reduktion von jeweils über 90 % bei Midibussen bzw. 95 % bei Solobussen ist möglich. Die Feinstaub-Emissionen (PM) können um 75 % gegenüber dem Diesel-Referenzbus gesenkt werden. Allerdings, wie aus der Wirtschaftlichkeitsberechnung deutlich geworden ist, sind diese Einsparungen an Emissionen mit einem

Mehraufwand an Kosten verbunden (siehe Kapitel 3.1), insbesondere bei einem vollständig emissionsfreien Betrieb (ohne Kraftstoffzusatzheizung).

Für den Betrieb mit Gasbussen können gegenüber dem Dieselbus insbesondere CO₂- sowie Feinstaub-Emissionen eingespart werden (siehe Abbildung 31). Mit der Datengrundlage des HBEFA (siehe Tabelle 10) fällt jedoch der Stickoxidausstoß (NO_x) höher aus als beim Dieselbus-betrieb. Ursächlich hierfür ist unter anderem die Mittelung der Ergebnisse verschiedener Messreihen und Fahrzeugtypen. Messungen an Einzelfahrzeugen ergeben zum Teil geringere NO_x-Emissionen als der Dieselbuseinsatz [7].

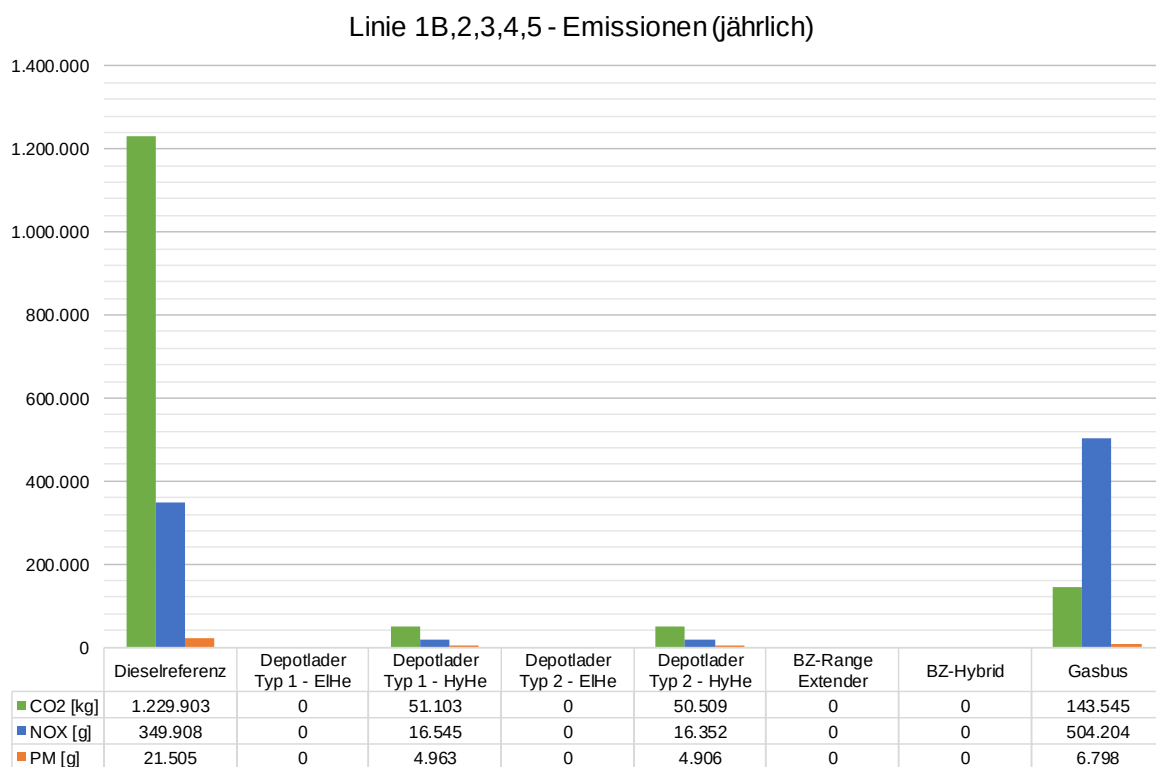


Abbildung 31: Jährliche Emissionen aller betrachteten Antriebstechnologien für den Betrieb der Linie 1B, 2, 3, 4 und 5 (Solobusse)

	Batteriebus Typ 1		Batteriebus Typ 2		BZ-Hybrid	BZ-RE	Gasbus
	ElHe	HyHe	ElHe	HyHe			
CO ₂ -Emissionen	100 %	96 %	100 %	96 %	100 %	100 %	88 %
NO _x -Emissionen	100 %	95 %	100 %	95 %	100 %	100 %	-44 %
PM-Emissionen	100 %	77 %	100 %	77 %	100 %	100 %	68 %

Tabelle 11: Emissionseinsparungen aller betrachteten Antriebstechnologien gegenüber der Diesel-Referenz

4. Umstellungskonzept (AP 4)

In AP 4 wurde auf Basis der Ergebnisse aus AP 2 und AP 3 ein Konzept für die schrittweise Umstellung des Stadtbussystems auf alternative Antriebstechnologien erarbeitet. Die hierbei verwendete Methodik und die Kriterien sind in Abschnitt 4.1 erläutert. In Abschnitt 4.2 werden allgemeine Technologieempfehlungen hergeleitet, welche sich aus den Erkenntnissen in den einzelnen Arbeitspaketen ergeben. In Abschnitt 4.3 sind die konkreten Umstellungsphasen zusammengefasst.

4.1 Methodik und Kriterien

Im Rahmen der technischen und betrieblichen Analyse und der nachgelagerten TCO-Betrachtung wurden vielversprechende technische Lösungen identifiziert und hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet. Die Minimierung der Lebenszykluskosten und des Fahrzeugmehrbedarfs (Mehrbedarf gegenüber Diesel-Referenz) waren dabei die wesentlichen Kriterien. Weiterhin wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Umstellung soll schrittweise erfolgen
- Infrastrukturmaßnahmen sollen gebündelt erfolgen
- Anzahl unterschiedlicher Fahrzeugtypen soll reduziert werden (Fahrzeuge sollen auf verschiedenen Linien eingesetzt werden können; keine linienspezifischen Sonderlösungen)
- Aktuelle Marktsituation soll insbesondere bzgl. der Verfügbarkeit und Reife der alternativen Antriebskonzepte berücksichtigt werden
- Umstellung soll kosteneffizient und unter Berücksichtigung aktueller Förderprogramme erfolgen

Neben den generellen Aspekten wurden bei der Erstellung des Umstellungskonzepts die spezifischen Anforderungen für Lindau berücksichtigt. Eine wesentliche Anforderung ist der Fokus auf die Elektrifizierung der Linien, die hauptsächlich auf der Insel in Lindau verkehren (Linie 1 und Linie 2). Des Weiteren soll die Umstellung der ganzen Flotte schrittweise und über mehrere Jahre erfolgen. Ein Hintergrund hierfür ist, dass eine erste Teilelektrifizierung Erfahrungen im Umgang mit Elektrobussen ermöglicht, zumal die zurzeit erwerbbaaren Elektrobusse eine geringere Verfügbarkeit als Dieselbusse aufweisen. Darüber hinaus kann man durch eine stufenweise Beschaffung von technischen Weiterentwicklungen der nächsten Jahre profitieren. Hierbei sind insbesondere höhere Reichweiten sowie steigende Passagierkapazitäten zu nennen.

4.2 Technologieempfehlung

Im Rahmen der Studie wurden die aktuell am Markt verfügbaren alternativen Antriebstechnologien detailliert analysiert. Der Vergleich der betrieblichen Konsequenzen, der Lebenszykluskosten (TCO) sowie der Emissionseinsparungen zeigte deutlich, dass die betrachteten Technologien unterschiedlich gut geeignet sind.

Im Vergleich zur Dieselreferenz haben die betrachteten Brennstoffzellenbusse ein sehr hohes Emissionsreduktionspotential, sofern sie mit grünem Wasserstoff betrieben werden. Zudem sind aufgrund der hohen Reichweite nur geringe betriebliche Anpassungen erforderlich. Diesen Vorteilen stehen allerdings eine geringe Kosteneffizienz und Marktreife gegenüber (vgl. Kapitel 3.1). Insbesondere Fahrzeuge mit Brennstoffzellen-Range-Extender werden bisher lediglich als Prototypen erprobt. Weiterhin müssten Brennstoffzellenfahrzeuge an einer externen Tankstelle befüllt werden, da aufgrund von Platzmangel keine Wasserstoffinfrastruktur auf dem Betriebshof errichtet werden kann. Dies erhöht die betriebliche Komplexität und verursacht zusätzliche Leerkilometer und Fahrzeit. Eine Umstellung auf Brennstoffzellenhybridbusse oder Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender im zeitlichen Nahbereich wird daher nicht empfohlen.

Der Gasbus erfordert die geringsten betrieblichen Anpassungen und kann zudem zu den geringsten Mehrkosten gegenüber dem Dieselbusbetrieb eingesetzt werden. Ein wesentlicher Nachteil des Gasbusbetriebs ist jedoch, dass lokale Schadstoff- und Lärmemissionen kaum reduziert werden (vgl. Kapitel 3.2.2), weshalb eine Umstellung auf Gasbusse nicht empfohlen wird.

Die Kosteneffizienz des Batteriebusseinsatzes hängt maßgeblich von der Ausnutzung der aktuellen Förderprogramme ab. Bei vollständiger Ausschöpfung der Fördermöglichkeiten des BMU sind die Lebenszykluskosten der Umstellung auf Batteriebusse geringfügig höher als bei Gasbussen und deutlich geringer als bei Brennstoffzellenbussen (vgl. Kapitel 3.1).

Die Emissionen des Batteriebusseinsatzes werden von dem verwendeten Heizkonzept bestimmt, wodurch sich ein unterschiedliches Emissionsreduktionspotential ergibt. Nur Batteriebusse mit einer vollelektrischen Heizung bieten die Möglichkeit eines lokal emissionsfreien Betriebs. Die Hybridheizung nutzt einen Kraftstoffzusatzheizer für kalte Wintertage, sodass die Emissionsfreiheit nicht ganzjährig gegeben ist. Ein wesentlicher Vorteil des Einsatzes einer Hybridheizung gegenüber einer vollelektrischen Heizung ist jedoch, dass das Batteriebusssystem kosteneffizienter ausgelegt werden kann. Ursächlich hierfür ist, dass der Kraftstoffzusatzheizer den elektrischen Energiebedarf zum Heizen verringert, sodass die Reichweite erhöht und somit der Fahrzeugmehrbedarf gegenüber einer vollelektrischen Heizung reduziert werden kann (vgl. Kapitel 2.3). Aufgrund der begrenzten Einsatzdauer im Jahr können Batteriebusse mit Hybridheizung dennoch signifikante Emissionseinsparungen von über 95 % CO₂ und NO_x sowie über 77 % PM gegenüber dem Dieselbusbetrieb erzielen.

Batteriebusse mit Hybridheizung bieten für das Stadtbussystem in Lindau einen guten Kompromiss aus Kosteneffizienz und Umweltnutzen. Das Marktangebot an geeigneten Fahrzeugen ist stetig steigend und erste Einsätze in größeren Flotten, z.B. in Eindhoven, Amsterdam oder London, stellten die Praxistauglichkeit der Technologie unter Beweis. Batteriebusse mit Hybridheizung sind deshalb das empfohlene alternative Antriebskonzept für den Stadtverkehr Lindau.

4.3 Umstellungsphasen

Eine wesentliche Anforderung an das Umstellungskonzept war die Aufteilung in mehrere Umstellungsphasen, sodass zunächst Erfahrungen gesammelt werden können und man mittelfristig von technischen Weiterentwicklungen profitieren kann. Eine Untergrenze für die Fahrzeuganzahl resultiert allerdings aus den Förderbestimmungen des BMU, welche eine Mindestanzahl von 6 Fahrzeugen vorgeben. Die Umstellung der Flotte wird daher als zweistufiger Prozess empfohlen, bei dem zunächst sechs Batteriebusse (drei Midibusse und drei Solobusse) bis 2021 angeschafft werden. In der zweiten Umstellungsphase bietet es sich dann an, die Gesamtflotte auf Batteriebusse umzustellen.

4.3.1 Umstellungsphase 1

In der ersten Umstellungsphase wird die Elektrifizierung der Linien 1A, 1B und 2 empfohlen, da die Vorteile einer Elektrifizierung mit geringen Schadstoff- sowie Lärmemissionen auf dem eng bebauten Inselkern am wirkungsvollsten sind. Neben den Linien 1A, 1B und 2 bietet es sich weiterhin an, zwei zusätzliche Fahrzeuge des Schülerverkehrs (Linie 31) umzustellen, sodass 6 Dieselsebusse durch 6 Batteriebusse ersetzt werden.

4.3.1.1 Einsatzkonzept Midibusse

Für das Einsatzkonzept der Midibusse in der ersten Umstellungsphase werden drei Batterie-Midibusse benötigt. Die aktuell gefahrene Linie 1 wird wie geplant in die Linienvarianten 1A und 1B aufgetrennt. Entgegen der geplanten Ausweitung des Linienverkehrs (vgl. Kapitel 1.1) macht es zunächst jedoch Sinn, die Linie 1B noch nicht auf Solobusse umzustellen, sondern als Midibus-Linie zu belassen. Zusätzlich würde ein Solobus, der zurzeit ausschließlich im Schülerverkehr eingesetzt wird (ein Fahrzeug der Linie 31), ebenfalls auf Midibusse umgestellt.

Die Anpassungen der Gefäßgröße bringen den Vorteil mit sich, dass die Fahrleistung der Batteriebusse in der ersten Phase erhöht wird und die Fahrzeuge so maximal ausgelastet werden. Die hohe Auslastung hat wiederum den Vorteil, dass die Investitionskosten relativiert und durch den höheren Einsatz der Batteriebusse mehr Emissionen eingespart werden. In Abbildung 32 wird das Einsatzkonzept der drei Midibusse schematisch aufgezeigt.

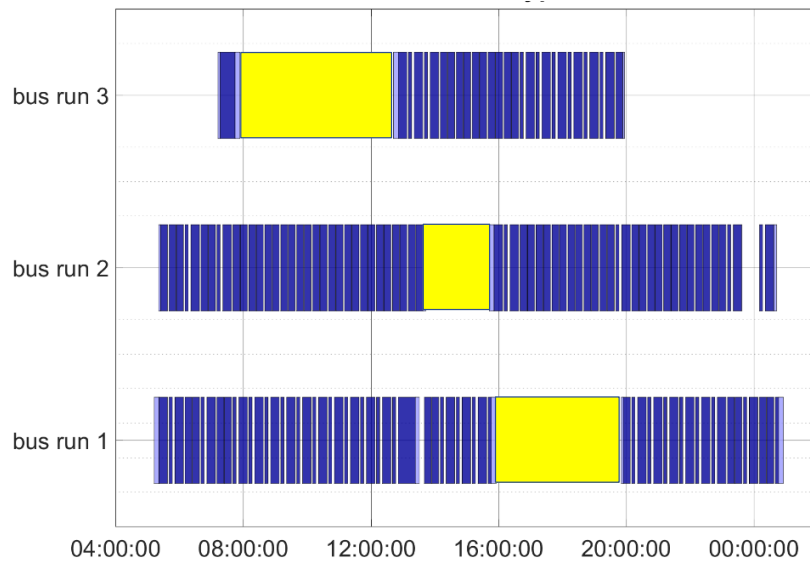


Abbildung 32: Einsatzkonzept Batterie-Midibusse - Phase 1

Die ursprünglichen Dieselbusumläufe wurden angepasst, um untertägig Ladefenster (gelbe Bereiche) zu generieren, in denen die Fahrzeuge für den weiteren Liniendienst nachgeladen werden. Die Nutzung des zuvor nur in den Spitzen eingesetzten Fahrzeugs des Schülerverkehrs ermöglicht, dass die Anpassungen ohne ein zusätzliches Fahrzeug erfolgen können.

Neben der Intensivierung der Auslastung der Fahrzeuge bringt das Einsatzkonzept einen weiteren Vorteil mit sich. Falls ein Batterie-Midibus ausfällt, besteht die Möglichkeit, den Ausfall durch die reguläre Diesel-Solobus-Reserve der Fahrzeugflotte auszugleichen. Gegebenenfalls würden dabei die Batterie-Midibusse rotieren, sodass der Diesel-Solobus auf der Linie 1B eingesetzt werden kann und die übrige Fahrleistung weiterhin durch Batterie-Midibusse erbracht wird. Der Übergang ist in Abbildung 33 dargestellt. Eine separate Reservehaltung für die Batterie-Midibusse ist damit nicht notwendig.

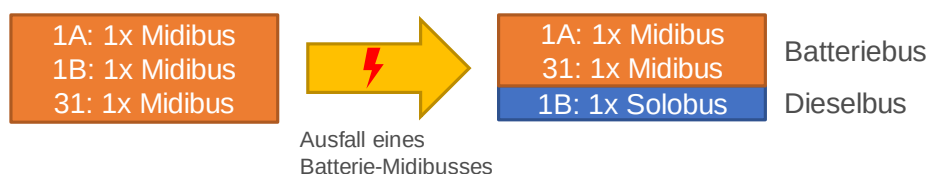


Abbildung 33: Konzept Fahrzeugreserve - Phase 1

4.3.1.2 Einsatzkonzept Solobusse

Das Einsatzkonzept für die drei Batterie-Solobusse sieht vor, dass diese auf der Linie 2 sowie für die verbleibende Schülerverkehrsleistung der Linie 31 eingesetzt werden. Somit würde die geplante Gefäßgrößenänderung von Midi- auf Solobusse für die Linie 2 vollzogen werden. Die Einbeziehung des Fahrzeugs aus dem Schülerverkehr ermöglicht, wie bei den Batterie-Midibussen, dass Ladephasen ohne zusätzliche Fahrzeuge in den Betriebsablauf integriert werden

können (vgl. Abbildung 34). Bei Ausfall eines Batterie-Solobusses würde ein Diesel-Solobus aus der vorhandenen Busflotte als Reserve eingesetzt.

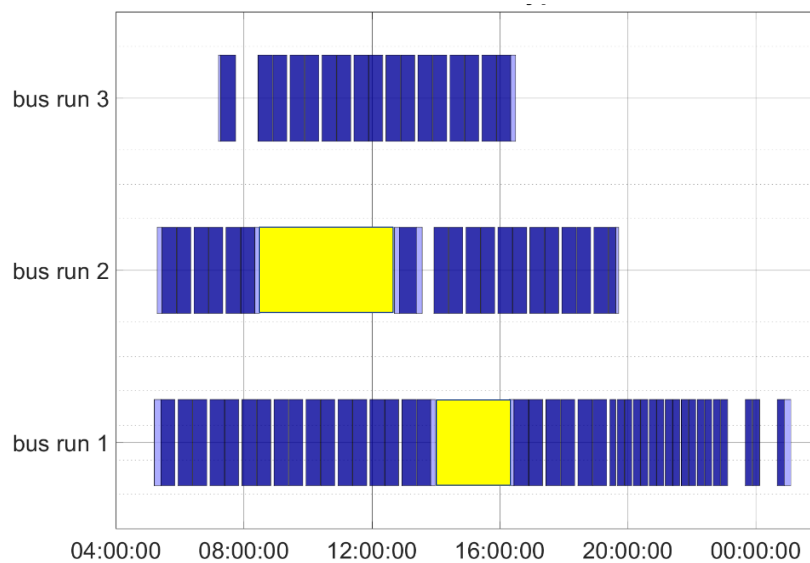


Abbildung 34: Einsatzkonzept Batterie-Solobusse - Phase 1

4.3.1.3 Einsatzkonzept Dieselbusse

Die verbliebene Linienfahrleistung wird im Zeitraum der ersten Umstellungsphase weiterhin durch Dieselbusse erbracht. Die Fahrzeugreserve wird ebenfalls weiterhin durch Diesel-Solobusse bereitgestellt und dient gleichzeitig als Reserve bei einem Ausfall eines Batteriebusses. Abhängig von der Reparaturanfälligkeit der Dieselfahrzeuge besteht die Möglichkeit, die aktuell eingesetzten 10 Diesel-Solofahrzeuge bis zum Zeitpunkt der zweiten Umstellungsphase weiter zu betreiben und erst bei einer Vollelektrifizierung auszumustern. Somit müssten im Zeitraum zwischen den Umstellungsphasen 1 und 2 keine neuen Dieselbusse beschafft werden. Die Fahrleistung der Linien 3, 4, 5, 41 und 985 sowie die Fahrzeugreserven können durch 10 Diesel-Solobusse erbracht werden.

4.3.1.4 Ladeinfrastruktur Betriebshof

Für die Umstellung auf den Betrieb mit Batteriebussen muss Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof errichtet werden. Hierfür sind Systeme mit Ladeleistungen bis zu 150 kW ausreichend und sinnvoll. Als Kontaktierungstechnik wird die standardisierte CCS-Steckertechnik empfohlen. Dies hat den Vorteil, dass eine hohe Anzahl an potentiellen Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturanbietern bei der Beschaffung zur Verfügung stehen.

Es wird empfohlen jede Abstellposition mit einem eigenen Ladekabel zu versehen, sodass Fahrzeuge im Betriebshof dauerhaft angeschlossen sind. Bezüglich der Anzahl der Ladegeräte besteht die Möglichkeit, dass ein 150 kW Ladegerät für zwei Fahrzeuge genutzt wird. Idealerweise

weise werden Ladegeräte beschafft, die ein Fahrzeug mit 150 kW oder optional zwei Fahrzeuge gleichzeitig mit 75 kW laden können. Somit wären für den Betrieb der ersten sechs Batteriebusse drei Ladegeräte mit jeweils 150 kW Ladeleistung erforderlich.

Bei der Errichtung von Ladeinfrastruktur stellt sich grundsätzlich die Frage, wie und in welchem Maße Arbeiten auch für zukünftige Beschaffungen durchgeführt werden. Insbesondere bauliche Maßnahmen, wie Tiefbauarbeiten für die Herrichtung des Netzanschlusses und Aufbau der Stromversorgungsinfrastruktur (Transformatoren, Netztechnik, etc.), sollten bereits zu Beginn für einen Vollausbau ausgelegt werden. Zudem bietet es sich an, die erforderliche Anzahl an Ladegeräten für eine vollständige Elektrifizierung der Flotte auch schon zu Beginn der Umstellung zu beschaffen. Neben dem geringeren Aufwand (z.B. durch zeitlich kompakte bauliche Maßnahmen, lediglich ein Ausschreibungsverfahren) ergeben sich auch betriebliche Vorteile, da ein möglicher Ausfall von Ladegeräten leicht kompensiert werden kann. Dementsprechend wird empfohlen, schon in der ersten Umstellungsphase 9 Ladegeräte auf dem Betriebshof zu errichten.



Abbildung 35: Skizze einer möglichen Ausbringung der Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof

In Abbildung 35 ist eine mögliche Ausbringung der Ladeinfrastruktur für eine Vollelektrifizierung der Flotte (insgesamt 17 Fahrzeuge, vgl. Kapitel 4.3.2) skizziert. Aktuell sind für Fahrzeuge des Stadtverkehrs Lindau nur 16 Abstellplätze vorhanden (blau markierte Stellplätze). Somit müsste im Zuge einer Vollelektrifizierung ein zusätzlicher Stellplatz geschaffen werden, bspw. durch bauliche Veränderungen oder Nutzung eines Stellplatzes, welcher momentan durch die Regionalbus Augsburg GmbH verwendet wird. Weiteren Platzbedarf hat die Übergabestation

der Mittelspannung, die hier exemplarisch auf den Grünflächen hinter der Abstellhalle eingezeichnet ist. Von dort werden die Niederspannungskabel an die Ladegeräte geführt. Die benötigte Netzanschlussleistung für eine Vollelektrifizierung beträgt ca. 1,5 MVA.

4.3.1.5 Ladeinfrastruktur ZUP

Das empfohlene Betriebskonzept sieht vor, dass Fahrzeuge untertägig nachgeladen werden (vgl. Abbildung 32 und Abbildung 34). Die Nachladung kann dabei auf dem Betriebshof durchgeführt werden. Die Ladeinfrastruktur, die für die Übernachtladung errichtet wird, kann hierfür genutzt werden, wodurch keine zusätzlichen Ladegeräte beschafft werden müssten. Jedoch würde hierbei zusätzlicher Aufwand und Leerfahrten entstehen, da die Fahrer zwischen den Endstellen der Linien bzw. dem *ZUP* und Betriebshof pendeln müssten. Die dabei entstehenden Zeitaufwände pro Ladephase der Busse wurden in Absprache mit dem Stadtverkehr Lindau zu 45 Minuten abgeschätzt. Somit würden bereits in der ersten Umstellungsphase 4-5 zusätzliche Fahrerstunden pro Einsatztag benötigt.

Als zentraler Punkt im Liniennetz bietet der *ZUP* gute Voraussetzungen für die Installation von Ladeinfrastruktur zur untertägigen Ladung. Hierdurch würden Fahrzeug- und Fahrerwechsel vereinfacht, so dass keine zusätzlichen Leerfahrten zum Betriebshof notwendig und zusätzliche Fahrerkosten minimiert werden.

Die Kosten für die Herrichtung des Netzanschlusses sowie für die Anschaffung der Ladestation betragen rund 250.000 €. Dabei wird unterstellt, dass die nötigen Netzanschlussanlagen (Trafo, etc.) auf städtischem Grund errichtet werden, so dass keine zusätzlichen Kosten (bspw. Grundstückserwerb) entstehen. Aufgrund der Vereinfachung des Fahrzeugs- und Fahrerwechsels und der Vermeidung zusätzlicher Fahrerkosten ist für die erste Umstellungsphase die Errichtung einer Ladestation am *ZUP* sinnvoll. Die Errichtungskosten amortisieren sich innerhalb der 10-jährigen Betrachtungsdauer.

4.3.1.6 Anfangsinvestition und Betriebskosten

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in AP 3 hat gezeigt, dass die Umstellung auf Batteriebusse zusätzliche Kosten im Vergleich zum Dieselbusbetrieb aufweist. Im Folgenden werden die Investitionskosten sowie die Annuitäten pro Nutzkilometer der ersten Umstellungsphase diskutiert und mit einer Dieselbusflotte verglichen.

In Tabelle 12 sind die Investitionskosten der ersten Umstellungsphase dargestellt. Hierbei wird von einem Vollausbau der Infrastruktur auf dem Betriebshof ausgegangen. Für die Umsetzung der ersten Umstellungsphase, belaufen sich die Anfangsinvestitionskosten auf insgesamt 5 Mio. €. Hierunter fallen die Fahrzeugbeschaffung der sechs Busse, die Ladeinfrastruktur für eine Vollelektrifizierung sowie eine Ladestation am *ZUP*. Die mögliche Fördersumme, die

durch die volle Ausschöpfung der Landes- und Bundesförderung erreicht werden könnte, beträgt 2,2 Mio. €. Somit würde ein Eigenanteil für den Stadtverkehr von ca. 2,8 Mio. € anfallen. Eine alternative Dieselbusbeschaffung würde zu einem Eigenanteil von ca. 1,4 Mio. € führen.

Position	Umfang	Investitionskosten Dieselbus-Referenz	Investitionskosten Batteriebusse
Fahrzeugbeschaffung	3x Midibusse, 3x Solobusse	1.740.000 €	3.243.750 €
Ladeinfrastruktur Betriebshof	9 Ladegeräte à 150 kW, Netzanschluss, Stromversorgungsinfrastruktur	-	1.493.050 €
Ladeinfrastruktur ZUP	1 Ladegeräte à 150 kW, Netzanschluss, Stromversorgungsinfrastruktur	-	286.400 €
Summe (ohne Förderung)		1.740.000 €	5.023.000 €
Mögliche Förderung (Landes- & Bundesförderung)		306.000 €	2.198.200 €
Eigenanteil Stadtverkehr Lindau		1.434.000 €	2.825.000 €

Tabelle 12: Anfangsinvestitionskosten Umstellungsphase 1

Neben den Anfangsinvestitionen gilt es auch die laufenden Kosten zu berücksichtigen, was im Rahmen der Studie anhand der Lebenszykluskosten (TCO) erfolgte. Für die Umstellung auf Batteriebusse in Phase 1 betragen die Annuitäten pro Nutzkilometer 1,80 €/km (inkl. Landes- und Bundesförderung). Dahingegen belaufen sich diese für die Dieselbusse auf 1,32 €/km. Die geringeren Betriebskosten der Batteriebusse können trotz Förderung die höheren Anfangsinvestitionen nicht kompensieren. Insgesamt ergeben sich bei Realisierung der ersten Umstellungsphase und einer jährlichen Fahrleistung der elektrifizierten Linien von ca. 400.000 km, Mehrkosten in Höhe von ca. 192.000 € pro Jahr.

4.3.2 Umstellungsphase 2

Nach der Teilelektrifizierung in Umstellungsphase 1, empfiehlt sich in einer zweiten Umstellungsphase ab dem Jahr 2024 das Busnetz in Lindau vollständig zu elektrifizieren. Während dieser Phase müssten die verbliebenen zehn Diesel-Solobusse durch elf Batterie-Solobusse ersetzt werden.

4.3.2.1 Einsatzkonzept Solobusse

Mit den Solobussen der ersten Umstellungsphase befinden sich nach einer Beschaffung der Fahrzeuge aus der zweiten Umstellungsphase insgesamt 14 Batterie-Solobusse in der Flotte des Stadtverkehrs. Die Fahrleistung der Linie 1B, sowie die verbliebene Fahrleistung der Linie 31, würde nun, wie geplant (vgl. Kapitel 1.1), vollständig auf Solobusse umgestellt. Für den Linienbetrieb werden hierbei 12 Fahrzeuge benötigt. Die verbliebenen zwei Busse werden für die Fahrzeugreserve der Batterie-Solobusse vorgehalten. In Abbildung 36 ist der Linienbetrieb der Batteriebusse für die gesamte Solobusfahrleistung exemplarisch dargestellt.

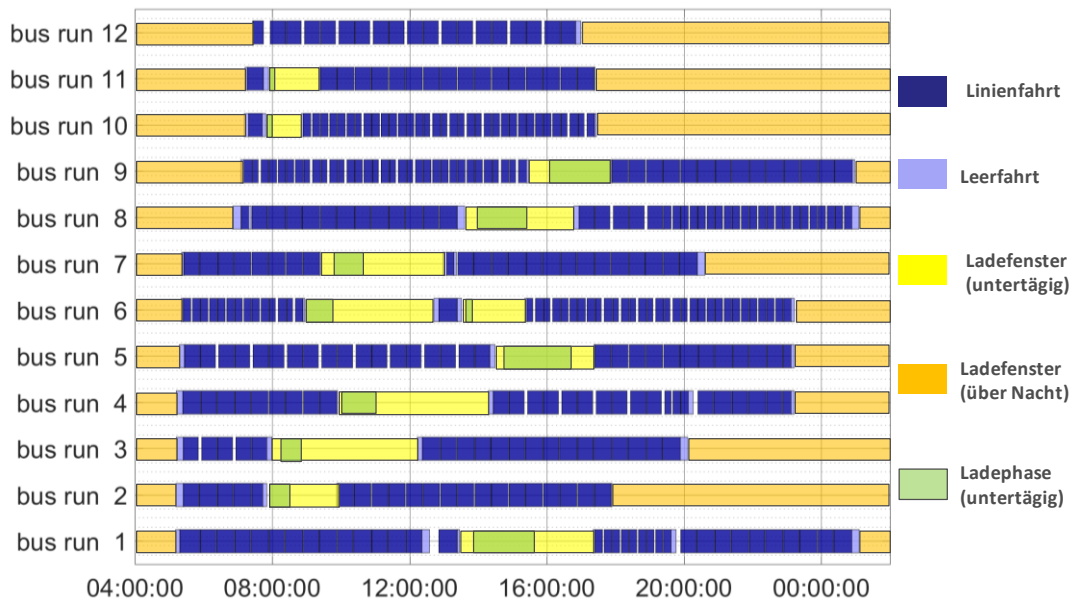


Abbildung 36: Einsatzkonzept Vollelektrifizierung – Batterie-Solobusse

4.3.2.2 Einsatzkonzept Midibusse

Das Einsatzkonzept der Midibusse verändert sich bei einer Vollelektrifizierung der Flotte im Vergleich zur Umstellungsphase 1. Die Fahrleistungen der Linien 1B und 31 werden nun vollständig mit Solobussen erbracht. Aufgrund dessen können ab der zweiten Umstellungsphase die drei Midibusse ausschließlich auf der Linie 1A eingesetzt werden, wobei zwei Busse für den Betrieb ausreichen und das dritte Fahrzeug als Reserve vorgehalten wird.

4.3.2.3 Ladeinfrastruktur

Wie in Kapitel 4.3.1 empfohlen, ist es sinnvoll, die gesamte Ladeinfrastruktur für eine Vollelektrifizierung auf dem Betriebshof bereits in der ersten Umstellungsphase zu beschaffen und zu errichten. Da aus Platzgründen nur eine Ladestation am ZUP installiert werden kann, muss während der zweiten Umstellungsphase keine zusätzliche Ladeinfrastruktur beschafft werden. Die untertägigen Ladephasen werden sowohl auf dem Betriebshof als auch am ZUP durchgeführt.

4.3.2.4 Anfangsinvestition und Betriebskosten

Die Investitionskosten der Umstellungsphase 2 sind in Tabelle 13 aufgezeigt. Das Investitionsvolumen der elf zu beschaffenden Batteriebusse beträgt insgesamt ca. 6,7 Mio. €. Nach Abzug einer möglichen Landes- und Bundesförderung (in Höhe von ca. 3,4 Mio. €) resultiert ein Eigenanteil von ca. 3,3 Mio. €. Im Vergleich zum Betrieb mit Dieselmotoren betragen die Mehrinvestitionskosten der zweiten Umstellungsphase ca. 0,9 Mio. €. Hierbei muss darauf hingewiesen werden, dass die Förderung des BMU langfristig nicht gesichert ist. Die in Kapitel 1.5.6

beschriebenen Förderquoten können sich in den kommenden Jahren ändern oder aufgehoben werden. Insbesondere für Umstellungen nach 2021 ist der Fortbestand der Fördermaßnahme ungewiss.⁹

Position	Umfang	Investitionskosten Diesel-Referenz	Investitionskosten Batteriebusse
Fahrzeugbeschaffung	11x Solobusse ¹⁰	3.000.000 €	6.737.500 €
Ladeinfrastruktur Betriebshof	Keine Ladeinfrastruktur notwendig	-	-
Ladeinfrastruktur ZUP	Keine Ladeinfrastruktur möglich	-	-
Summe (ohne Förderung)		3.000.000 €	6.737.500 €
Mögliche Förderung (Landes- & Bundesförderung)		600.000 €	3.432.000 €
Eigenanteil Stadtverkehr Lindau		2.400.000 €	3.305.000 €

Tabelle 13: Anfangsinvestitionskosten Umstellungsphase 2

Die Annuitäten pro Nutzkilometer belaufen sich nach einer Vollelektrifizierung der Flotte bei voller Inanspruchnahme der Landes- und Bundesförderung auf 1,69 €/km. Sofern eine Bundesförderung nicht möglich ist und nur auf die Förderung des Landes zurückgegriffen werden kann, steigen die Annuitäten pro Nutzkilometer auf einen Wert von 2,10 €. Im Vergleich hierzu liegen die Betriebskosten für einen reinen Dieselbusbetrieb bei 1,39 €/km. Bei einer jährlichen Fahrleistung von rund 1.000.000 km resultieren somit Mehrkosten im Bereich von 300.000 € (bei maximaler Landes- und Bundesförderung) bis 710.000 € (nur Landesförderung) pro Jahr.

⁹ Die „Richtlinien zur Förderung der Anschaffung von Elektrobussen im öffentlichen Personennahverkehr“ des BMU gilt in ihrer aktuellen Fassung bis Ende 2021. [8]

¹⁰ Bei einem reinen Dieselmotorbetrieb müssten nur 10 Fahrzeuge beschafft werden.

5. Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen der Studie wurde die Elektrifizierung der Busflotte der Stadtverkehrs Lindau mit Batteriebussen, Brennstoffzellenbussen und Gasbussen untersucht. Hierbei wurden unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen und Klimatisierungskonzepte betrachtet. Für alle Varianten wurden angepasste Betriebskonzepte erstellt und hinsichtlich ihrer betrieblichen Konsequenzen und der resultierenden Total-Cost-of-Ownership (TCO) bewertet.

Die technische und betriebliche Analyse hat gezeigt, dass eine Umstellung auf alternative Antriebe grundsätzlich möglich ist. Jedoch sind betriebliche Anpassungen notwendig, die insbesondere für Batteriebusse mit elektrischer Heizung zu einem Fahrzeugmehrbedarf führen. Im Rahmen der Studie wurde weiterhin deutlich, dass die Elektrifizierung durch den Aufbau von Ladeinfrastruktur wesentliche Konsequenzen für den Betriebshof mit sich bringt. Der Aufbau einer Tankinfrastruktur für Wasserstoff- oder Gasbusse ist auf dem Betriebshof nicht realisierbar. Die Nachtankung muss an externer Stelle durchgeführt werden.

Im direkten Vergleich zur Dieselmotortechnologie führt die Umstellung der Antriebstechnologie, unter den getroffenen Annahmen dieser Studie, zu deutlich höheren Anfangsinvestitionen. Ursächlich hierfür sind die höheren Fahrzeugpreise und, für den Fall der Batteriebusse, die Investitionskosten für den Aufbau der Ladeinfrastruktur. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat gezeigt, dass die Mehrkosten nicht durch geringere operative Kosten kompensiert werden können. Auch unter Berücksichtigung möglicher Förderungen durch Land und Bund verbleibt der Betrieb mit Dieselbussen die kostengünstigste Alternative.

Ein wesentlicher Vorteil der alternativen Antriebskonzepte ist die Reduzierung der Schadstoff- und Lärmemissionen. Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit vollelektrischer Heizung fahren lokal vollständig emissionsfrei. Batteriebusse mit Hybridheizung haben ebenfalls hohe Einsparpotentiale im Vergleich zum Dieselbusbetrieb, wohingegen Gasbusse mit Biomethan lediglich klimaschädliche Emissionen weitestgehend vermeiden können und lokale Emissionen weiterhin anfallen.

Auf Basis der Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete wurden Technologieempfehlungen abgeleitet und ein mögliches Umstellungskonzept erarbeitet. Batteriebusse mit Hybridheizung wurden im Rahmen der Studie als sinnvollste alternative Antriebsoption ermittelt. Die Einführung der Batteriebusse wird in zwei Stufen empfohlen, in denen zunächst sechs Fahrzeuge bis zum Jahr 2021 und anschließend elf weitere Fahrzeuge bis zum Jahr 2024 beschafft werden. Der Betrieb der Batteriebusse erfordert Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof und am ZUP, dessen vollständiger Ausbau bereits in der ersten Umstellungsphase sinnvoll ist.

Referenzen

- [1] Stadtwerke Lindau (B), [Online]. Available: https://www.sw-lindau.de/media/filer_public/0d/94/0d94dfa3-e212-484f-9007-5a58536588b0/liniennetz.pdf.
- [2] NOW GmbH, „Einführung von Wasserstoffbussen im ÖPNV,“ 2019.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Bekanntmachung zur Pkw-Energieverbrauchskennzeichnungsverordnung,“ 2019.
- [4] Regierung Bayern, „Busförderung nach dem Bayerischen Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetz (BayGVFG)“.
- [5] Infras, „Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs,“ 2019.
- [6] I. Shancita, H. Masjuki, M. Kalam, I. Rizwanul Fattah, M. Rashed und H. Rashedul, „A review on idling reduction strategies to improve fuel economy and reduce exhaust emissions of transport vehicles,“ *Energy Conversion and Management*, Nr. 88, pp. 794-807, 2014.
- [7] DVGW Deutscher Verein des Gas-und Wasserfaches e. V., „Bewertung von Gasbussen für den öffentlichen Personennahverkehr und Vergleich mit Alternativkonzepten,“ 2019.
- [8] BMU, „Das Bundesumweltministerium fördert Elektrobusse,“ 2020.

A. Anhang

Umweltauswirkungen (AP 3)

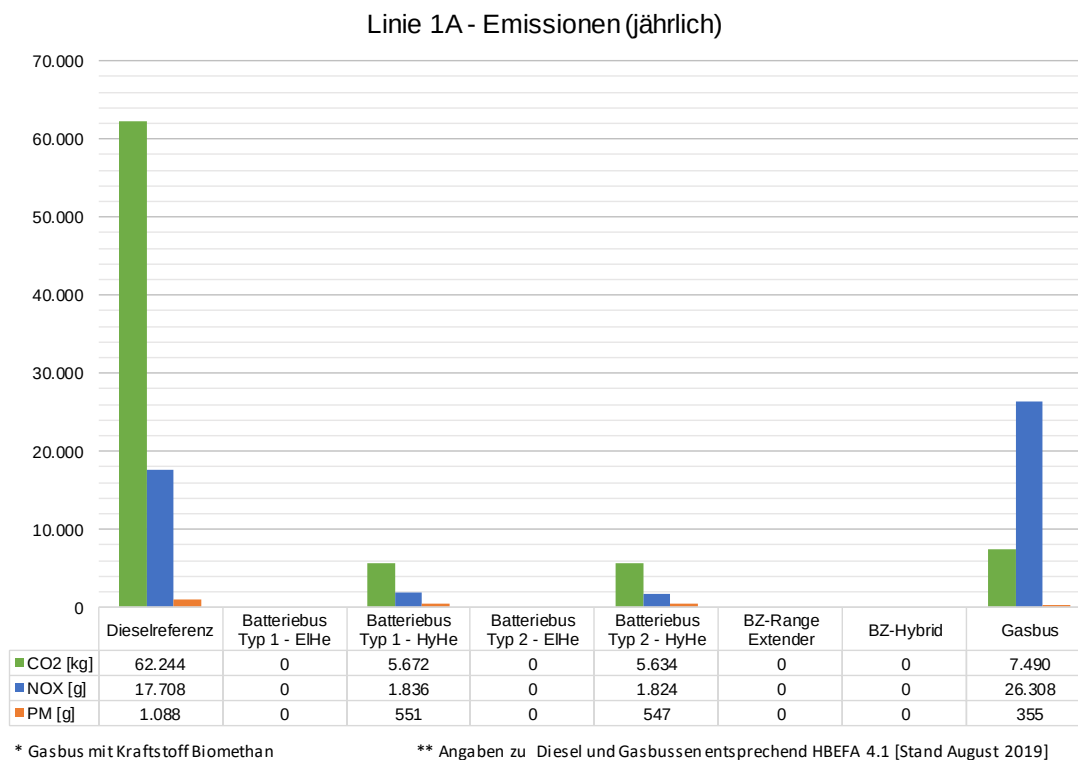


Abbildung 37: Fahrleistung Linie 1A – jährliche Umweltemissionen

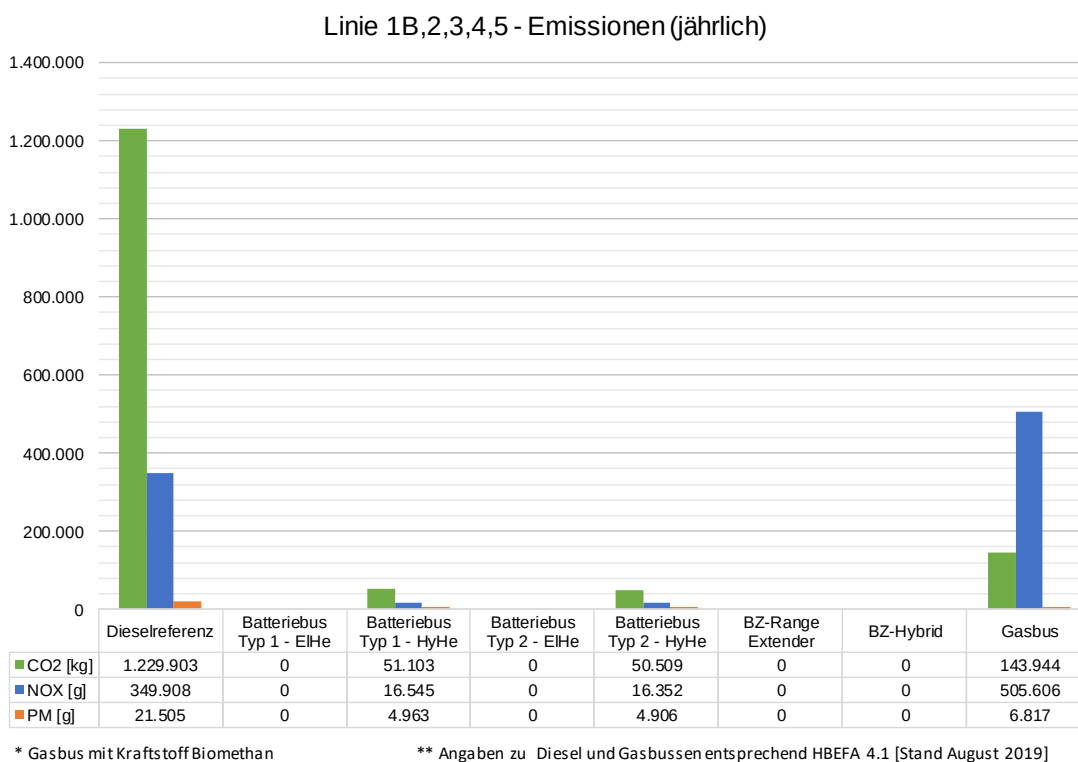
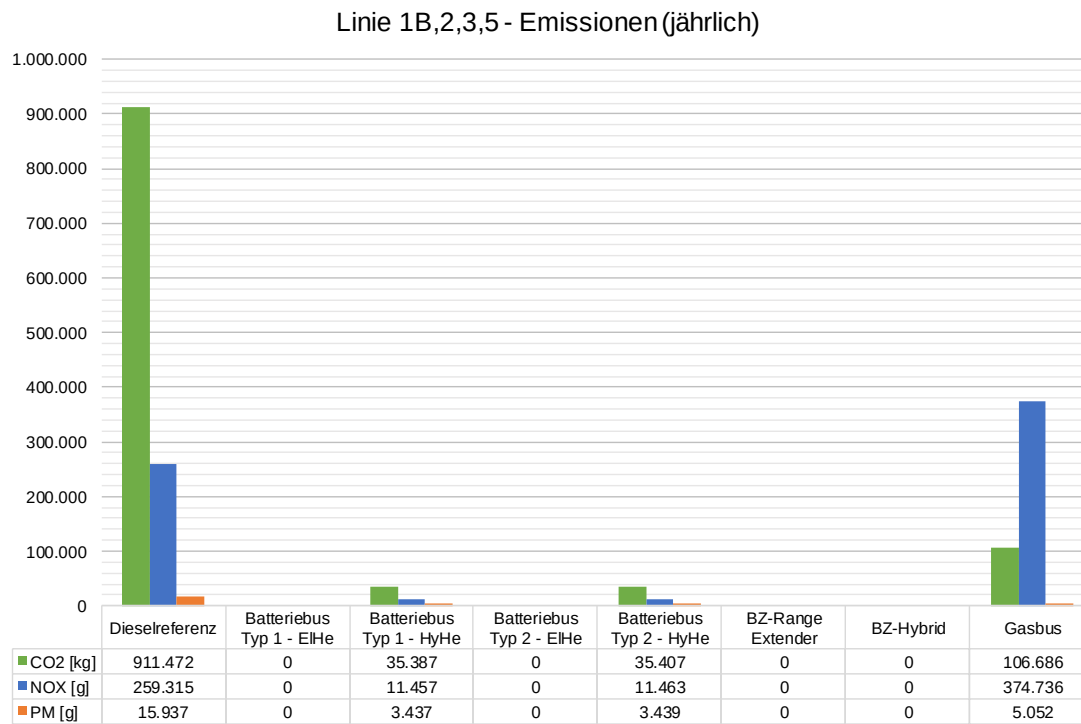


Abbildung 38: Fahrleistung Linien 1B, 2, 3, 4, 5 - jährliche Umweltemissionen



* Gasbus mit Kraftstoff Biomethan

** Angaben zu Diesel und Gasbussen entsprechend HBEFA 4.1 [Stand August 2019]

Abbildung 39: Fahrleistung Linien 1B, 2, 3, 5 - jährliche Umweltemissionen