



# Elektrifizierung des Stadtbussystems INGO

---



## Abschlussbericht

Kunde: Stadt St. Ingbert  
Am Markt 12  
66386 St. Ingbert

Autoren: Schreven, Sebastian  
Rogge, Matthias

Datum: 25.06.2020



Kurzzusammenfassung / Executive Summary.....	- 2 -
Studieninhalte .....	- 7 -
1. Überblick Stand der Technik (AP 1.1).....	- 8 -
1.1 Elektrischer Antriebsstrang .....	- 8 -
1.2 Energiespeicher .....	- 10 -
1.3 Nebenverbraucher und Klimatisierungskonzepte.....	- 13 -
1.4 Umweltauswirkungen .....	- 13 -
1.5 Batteriebus .....	- 14 -
1.6 Dieselhybridbus .....	- 19 -
1.7 Oberleitungsbus .....	- 21 -
1.8 Brennstoffzellenbus.....	- 23 -
1.9 Minibus als Kleinbus im Linienverkehr .....	- 26 -
2. Grundlagenermittlung und Aufnahme der lokalen Situation (AP 1).....	- 28 -
2.1 Betriebsdaten INGO-Linien .....	- 28 -
2.2 Grundlagen und technische Annahmen für die Studie .....	- 30 -
2.3 Busabstellung .....	- 35 -
2.4 Potenzielle Ladeorte für Batteriebusse .....	- 37 -
2.5 Gewerbebuslinien .....	- 40 -
2.6 Clean Vehicle Directive.....	- 40 -
3. Technische und betriebliche Analyse (AP 2) .....	- 42 -
3.1 Methodik und Kriterien .....	- 42 -
3.2 Detailergebnisse Standardladung .....	- 43 -
3.3 Detailergebnisse Schnellladung.....	- 47 -
3.4 Ergebnisse Brennstoffzellenbusse.....	- 50 -
3.5 Auswirkungen der Ladefenster auf die Dienste der Fahrer .....	- 51 -
3.6 Ergebnisübersicht und Diskussion.....	- 53 -
4. Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkungen (AP 3).....	- 56 -
4.1 Wirtschaftlichkeitsanalyse .....	- 56 -
4.2 Umweltauswirkungen .....	- 67 -
5. Umstellungskonzept (AP 4) .....	- 70 -
5.1 Methodik und Kriterien .....	- 70 -
5.2 Technologieempfehlung.....	- 71 -
5.3 Umstellungskonzept.....	- 72 -
5.4 Elektrifizierung Gewerbebuslinien .....	- 74 -
6. Zusammenfassung und Fazit .....	- 77 -
A. Anhang .....	- 79 -
A1 Umstellungsalternativen.....	- 79 -

## Kurzzusammenfassung / Executive Summary

Die vorliegende Studie umfasst die betriebliche, technische, wirtschaftliche und ökobilanzielle Bewertung einer Elektrifizierung des Stadtbussystems INGO in St. Ingbert. Aufbauend auf den Ergebnissen wurden ein konkretes Umstellungskonzept erarbeitet. Prämisse der Analyse war, dass der Liniendienst in seiner jetzigen Form beibehalten wird. Die Fahrgäste sollen durch die Elektrifizierung hinsichtlich der Beförderungsleistung sowie der Komfortmerkmale der Fahrzeuge keine Einschränkung erfahren.

### **Elektrobuskonzepte**

Als relevante Elektrobuskonzepte wurden Batteriebusse sowie Brennstoffzellenbusse identifiziert und im Rahmen der Studie betrachtet. Für Batteriebusse wurden unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen untersucht. Wesentliche Herausforderungen der Batteriebusse sind ihre begrenzte Reichweite und der Nachladebedarf während des Tages, die zu betrieblichen Anpassungen (wie bspw. einem Fahrzeugmehrbedarf oder zur Umgestaltung der Umlaufplanung) führen können. Im Zuge der Studie wurden drei Batteriekapazitäten analysiert, die sich am Elektrobusmarkt verfügbaren Systemen orientierten. Neben den Batteriegrößen wurden ebenfalls unterschiedliche Ladekonzepte sowie verschiedene Ladeorte untersucht. Als Ladekonzepte wurden die sogenannte Standardladung, die sich durch die manuelle CCS-Steckerladung mit 150 kW Ausgangsladeleistung auszeichnet, sowie die Schnellladung betrachtet. Schnellladesysteme beschreiben Ladeleistungen zwischen 300 kW und 450 kW, wobei die Busse über eine Kontakthaube und Pantographen nachgeladen werden.

Brennstoffzellenbusse wurden in der Studie in zwei Konfigurationen untersucht. Zum einen wurden Brennstoffzellenhybridbusse analysiert, die den klassischen Wasserstoffbus darstellen. In diesem Konzept werden ein leistungsstarkes Brennstoffzellensystem, eine große Tankkapazität sowie ein kleines Batteriesystem in das Fahrzeug verbaut. Die Energie für das Antriebssystem und die Nebenverbraucher wird hierbei primär aus der Brennstoffzelle bezogen. Alternativ wurden ebenfalls Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender betrachtet. Hierbei wird ein großes Batteriesystem mit kleinem Brennstoffzellensystem und reduzierter Wasserstofftankkapazität im Fahrzeug verbaut. Ein großer Teil der Energie wird direkt aus der Batterie bezogen, weshalb ebenfalls Ladeinfrastruktur (analog zu den reinen Batteriebussen) errichtet werden muss.

Die Reichweite der Fahrzeuge ist, neben dem Energiebedarf für Traktion, ebenfalls mit dem Energiebedarf für die Heizung und Klimatisierung des Innenraums (Heizung-Lüftung-Klimatisierung, HLK) verknüpft. Insbesondere bei sehr hohen oder sehr niedrigen Außentemperaturen verbrauchen das Heizen bzw. die Klimatisierung große Energiemengen. Dies begrenzt die Reichweite und muss bei der Auslegung der Elektrobusse berücksichtigt werden. In Deutschland hat vor allem der Heizbedarf bei sehr niedrigen Temperaturen großen Einfluss auf die Reichweite. Daher kann es vorteilhaft sein, in Batteriebussen einen fossilen Zusatzheizer einzubauen, so dass die Batterie nicht für extreme Temperaturen ausgelegt werden muss, die

nur an sehr wenigen Tagen im Jahr vorkommen. In der Studie wurden für Batteriebusse sowohl eine vollelektrische Heizung und Klimatisierung als auch eine elektrische Klimatisierung mit zusätzlichem fossilen Zusatzheizer („Hybridheizung“) betrachtet. Die Fahrzeugkonzepte mit Brennstoffzelle wurden ausschließlich mit vollelektrischer Heizung untersucht.

### **Infrastruktur und Ladeorte**

Neben den Fahrzeugkonzepten sind zur Bewertung der technischen Machbarkeit die Errichtungsoptionen von Lade- bzw. Tankinfrastruktur von entscheidender Bedeutung. Im Zuge der Studie wurden für Batteriebusse Betriebskonzepte mit zwei unterschiedlichen Ladeorten untersucht. Der Betrieb mit Batteriebusen erfordert sowohl tagsüber als auch über Nacht Ladefenster. Da die Fahrzeuge an der Abstellhalle in der *Sophie-Krämer-Straße* über Nacht abgestellt werden, muss dort in jedem Fall Ladeinfrastruktur zur Übernachtladung errichtet werden. Aufgrund dessen wurde die Abstellhalle auch als möglicher Ladeort für die untertägige Nachladung analysiert. Hierbei werden die Fahrzeuge aus dem Linienbetrieb genommen und durch andere Fahrzeuge ersetzt. Hierdurch entstehen zusätzliche Leerfahrten, Komplexitäten in der Betriebsplanung, und der Fahrzeugbedarf steigt an. Darüber hinaus wurde als potentieller Ladeort der *Rendezvous-Platz* identifiziert. Die Besonderheit des Stadtbussystems INGO sind die halbstündigen „Treffen“ aller Busse der INGO-Linien am *Rendezvous-Platz*. Fahrzeuge können hierbei vereinfacht getauscht werden, so dass Synergieeffekte entstehen können.

Bei Einsatz von Brennstoffzellenbussen wird Wasserstoff (H<sub>2</sub>) in gasförmigem Zustand benötigt, mit dem die Fahrzeuge betankt werden. Die Nachtankung des Wasserstoffs kann dabei an einer eigenen Tankanlage an der Abstellhalle stattfinden oder durch eine externe Anlage erfolgen. Der Flächenbedarf für die Tankanlage ist nicht unerheblich, da die Systeme aufgrund von Wartungs- und Kontrollbedarf in der Regel ebenerdig installiert werden. Durch eigene Tankanlagen entstehen neben den Errichtungskosten jedoch weitere Aufwände durch bspw. den Aufbau von Kompetenzen zum Betrieb der Anlage. Eigene Tankanlagen sind erst für größere Flotten und Fahrzeuganzahlen sinnvoll. Für Konzepte mit Brennstoffzellenfahrzeugen wurden in der Studie somit Betriebskonzepte mit Betankung an einer externen Tankstelle untersucht (analog zum Betrieb mit Dieselsebussen).

### **Technische Machbarkeit und betriebliche Auswirkungen**

Für jedes Elektrobuskonzept wurden die technische Machbarkeit, die betrieblichen Anpassungen und der Fahrzeugmehrbedarf ermittelt. Im Vergleich der Elektrifizierungslösungen mit Batterie- oder Brennstoffzellenbussen hat sich gezeigt, dass Brennstoffzellenkonzepte aufgrund der hohen Reichweite der Fahrzeuge keine betrieblichen Anpassungen zum Dieselsebussenbetrieb benötigen. Der Betrieb sowie die Dienstplanung der Fahrer können in ihrer jetzigen Form beibehalten werden. Batteriebusse verfügen über geringere Reichweiten, so dass für diese Konzepte betriebliche Anpassungen an der Umlaufplanung und der Einsatz von einem oder zwei zusätzlichen Fahrzeugen notwendig sind.

Der Konzeptvergleich zwischen einer Nachladung an der Abstellhalle und einer Nachladung am *Rendezvous-Platz* hat gezeigt, dass unabhängig vom Ladeort fast immer zusätzliche Fahrzeuge benötigt werden. Der wesentliche Unterschied der beiden Ladeorte ergibt sich für die Dienste der Fahrer und entsprechend für die Dienstplanbildung. Durch die verminderten Reichweiten der Batteriebusse müssen Ladefenster in die Umlaufpläne der Fahrzeuge integriert werden. Die aktuelle Umlaufplanung der Dieselbusse wurde auf die Dienste der Fahrer abgestimmt, wobei zwei Fahrer je einem Dieselbus zugeordnet sind (jeweils ein Dienst vor- und nachmittags). Da im Batteriebusseinsatz zusätzliche Fahrzeuge notwendig werden, müssen die Fahrer die Busse innerhalb ihres Dienstes tauschen. Die Tausche können hierbei, sofern die Busse untertägig am *Rendezvous-Platz* nachladen, während der Pausen der aktuellen INGO-Dienste durchgeführt werden, so dass keine zusätzlichen Fahrerkosten entstehen. Bei einer Nachladung an der Abstellhalle kann der Tausch nicht innerhalb der vorhandenen Pausenzeit erfolgen, so dass zusätzliche Dienste und somit Fahrerkosten notwendig werden.

Weiterhin hat die Machbarkeitsprüfung ergeben, dass Konzepte mit Standardladung tendenziell ein Fahrzeug mehr benötigen als Konzepte mit Schnellladung. Die Energiemenge, die während der Ladefenster bei der Schnellladung in das Fahrzeug geladen werden kann, ist höher, wodurch die Fahrzeuge schneller wieder für den Liniendienst genutzt werden können.

Die Variation der Batteriekapazitäten hat gezeigt, dass durch deren Vergrößerung die Reichweiten ohne Zwischenladung erhöht werden können und somit weniger Ladefenster am Tag notwendig sind. Durch die Reduzierung der Ladefenster wird die Anzahl der Fahrzeugtausche gesenkt, wodurch die Komplexität des Betriebs vermindert und die Einsatzflexibilität erhöht werden kann. Auf den Fahrzeugbedarf haben die untersuchten Batteriegrößen nahezu keinen Einfluss, so dass nur bei wenigen Konzepten Fahrzeuge eingespart werden können.

Darüber hinaus hat der Vergleich der Klimatisierungskonzepte ergeben, dass der Fahrzeugbedarf nur für wenige Fahrzeugkonfigurationen gesenkt werden kann. Jedoch werden in der technischen Machbarkeitsprüfung für Konzepte mit Hybridheizung die Worst-Case-Bedingungen abgeschwächt. Hierdurch sinkt der Energiebedarf der Nebenverbraucher und die Reichweite erhöht sich. In Folge dessen, können die Anzahl der Ladefenster (und somit auch die Anzahl der Fahrzeugtausche) für den Einsatz einer Hybridheizung ebenfalls reduziert werden.

## **Wirtschaftlichkeitsanalyse und Umweltauswirkungen**

Im Rahmen der Studie erfolgte für alle Elektrobuskonzepte eine Wirtschaftlichkeitsrechnung, in der die Lebenszykluskosten berechnet und mit der Dieselreferenz verglichen wurden. Die Wirtschaftlichkeitsrechnung hat gezeigt, dass der Dieselbusbetrieb kostengünstiger ist als der Betrieb mit Elektrobussen. Die höheren Anfangsinvestitionskosten der Elektrobuskonzepte können nicht durch geringe operative Kosten kompensiert werden. Auch unter Berücksichtigung möglicher Förderprogramme (bspw. durch das des Bundesverkehrs- oder des Bundesumweltministerium) sind die Lebenszykluskosten der Elektrobuslinien höher als die des Dieselbusbetriebs.

Konzepte mit Brennstoffzellenbussen sind in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung kostenintensiver als Konzepte mit Batteriebusen. Die Mehrkosten betragen hierbei zehn Prozent bis 15 Prozent gegenüber dem Batteriebusbetrieb und 30 Prozent bis 40 Prozent gegenüber dem Betrieb mit Dieselbussen. Dies ist durch die hohen Energiekosten für den Bezug des Wasserstoffs begründet.

Für Batteriebuskonzepte gilt allgemein, dass durch die Einsparungen der zusätzlichen Dienste eine Nachladung am *Rendezvous-Platz* kostengünstiger ist als eine reine Nachladung an der Abstellhalle. Darüber hinaus lässt sich festhalten, dass Konzepte mit Standardladung kosteneffizienter sind als Konzepte mit Schnellladung. Der Fahrzeugbedarf kann durch letztere nicht gesenkt werden, demgegenüber stehen jedoch höhere Investitionskosten für die Infrastruktur.

Zusätzlich zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden in der Studie die ökobilanziellen Auswirkungen der Elektrobussysteme errechnet und mit der Dieselreferenz verglichen. Hierbei wurden die Emissionen von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), Stickoxid (NO<sub>x</sub>) und Feinstaub (PM) ermittelt. Bei ausschließlicher Verwendung von (bilanziell) emissionsfreiem Strom aus regenerativen Energiequellen bzw. „grünem“ Wasserstoff unterscheiden sich die Umweltauswirkungen nur im Vergleich der untersuchten Heizungskonzepte der Elektrobusse. Für den Einsatz einer voll-elektrischen Heizung werden keine Schadstoffe emittiert, wodurch ca. 630 t CO<sub>2</sub>, 180 kg NO<sub>x</sub> und 11 kg Feinstaub im Jahr eingespart werden können. Auch bei einem Einsatz einer Hybridheizung können große Mengen an Schadstoffemissionen eingespart werden. Hierbei werden die Emissionen bis zu 95 Prozent (für CO<sub>2</sub> & NO<sub>x</sub>) bzw. bis zu 75 Prozent (Feinstaub) im Vergleich zum Dieselbusbetrieb reduziert.

## **Umstellungskonzept**

Auf Basis der Analyse wurden verschiedene Umstellungsalternativen erarbeitet und ein konkretes Umstellungskonzept hergeleitet. Batteriebuskonzepte weisen zwar den Bedarf höherer betrieblicher Anpassungen (bspw. in Form zusätzlicher Fahrzeuge oder Umlaufanpassungen) im Vergleich zu Brennstoffzellenbussen auf, jedoch ist der Einsatz von Batteriebusen durch die geringeren operativen Kosten deutlich kosteneffizienter. Weiterhin hat die Studie gezeigt,

dass eine Nachladung am *Rendezvous-Platz* keine zusätzlichen Dienste erfordert. Aufgrund dessen wird eine Umstellung mittels Batteriebusen und Nachladung am *Rendezvous-Platz* empfohlen. Hierfür werden acht Batteriebusse mit einer Batteriekapazität von mindestens 350 kWh und einer Hybridheizung notwendig. Weiterhin werden vier Ladegeräte mit 150 kW Ladeleistung an der Abstellhalle und zwei Ladegeräte mit 150 kW Ladeleistung am *Rendezvous-Platz* benötigt. Diese Lösung bietet für das Stadtbussystem INGO einen guten Kompromiss zwischen betrieblichen und dienstlichen Anpassungen, Kosteneffizienz und Umweltnutzen.

Aktuell ist die Fahrleistung der INGO-Linien durch die Stadt St. Ingbert bis Mitte 2021 an *Saar-Mobil* vergeben. Zu diesem Zeitpunkt muss die Fahrleistung neu ausgeschrieben und vergeben werden. Angesichts der Zeitaufwände für die Akquirierung von Fördermitteln, den Ausschreibungsprozess sowie die Lieferzeiten der Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur ist die Umsetzung bis Mitte 2021 für den potentiellen Betreiber relativ anspruchsvoll. Die genannten Prozesse können mehrere Jahre dauern. **Es empfiehlt sich daher, dass die Ausschreibung der Stadt St. Ingbert so gestaltet wird, dass zunächst (für bspw. 2 Jahre) der Liniendienst der INGO-Linien weiterhin mit Dieselsebussen erbracht werden darf. Danach könnte die Fahrleistung vollständig durch Elektrobussysteme erbracht werden. Dies gibt dem Betreiber genügend Zeit das Konzept inkl. etwaiger Förderungen und kosteneffizient umzusetzen.**

## Studieninhalte

Die vorliegende Studie „Elektrifizierung des Stadtbussystems INGO“ untersucht und bewertet das Busnetz der „INGO-Linien“ in der Stadt St. Ingbert hinsichtlich einer Elektrifizierung, sowohl mittels Batterie- als auch mit Brennstoffzellenbussen. Sie gliedert sich in vier Arbeitspakete, welche in Abbildung 1 dargestellt sind.

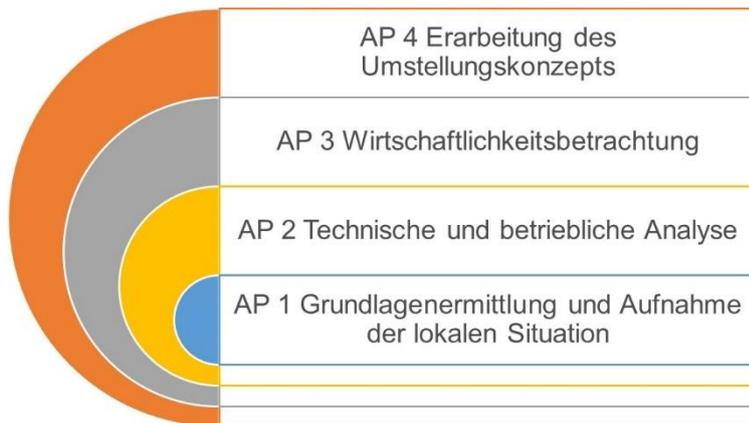


Abbildung 1: Übersicht der vier Arbeitspakete der Studie

Zunächst wird ein kurzer Überblick über den aktuellen Stand der Technik gegeben. Weiterhin wird die konkrete betriebliche Situation erfasst und potentielle Orte für die Errichtung von Infrastruktur werden bewertet (AP 1). Als technologische Optionen werden Batteriebusse mit ausschließlicher Ladung auf dem Betriebshof, Batteriebusse mit untertägiger Nachladung am *Rendezvous-Platz* sowie Brennstoffzellenbusse betrachtet und die technische Machbarkeit sowie die betrieblichen Konsequenzen für jede Technologie ermittelt (AP 2). Die aus einer Umstellung resultierenden finanziellen und ökologischen Auswirkungen 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. Überblick Stand der Technik (AP 1.1)

Im Folgenden werden umweltfreundliche Alternativen zum konventionellen Dieselbus für den öffentlichen Personennahverkehr vorgestellt und diskutiert. Dabei handelt es sich um verschiedene aktuell am Markt verfügbare Elektrobustypen, die maßgeblich durch ihren elektrischen Antriebsstrang charakterisiert sind. Zum Grundverständnis werden zunächst wichtige Hauptkomponenten und Merkmale der Elektrobusse erläutert, bevor auf die spezifischen Komponenten und Konzepte näher eingegangen wird.

### 1.1 Elektrischer Antriebsstrang

Während konventionelle Fahrzeuge ihre Antriebsenergie aus fossilen Energieträgern schöpfen, zeichnen sich Elektrobusse durch einen elektrischen Antriebsstrang aus. Der Elektromotor, der elektrische Energie in mechanische umwandelt, definiert dabei das Alleinstellungsmerkmal aller Elektrobusse.

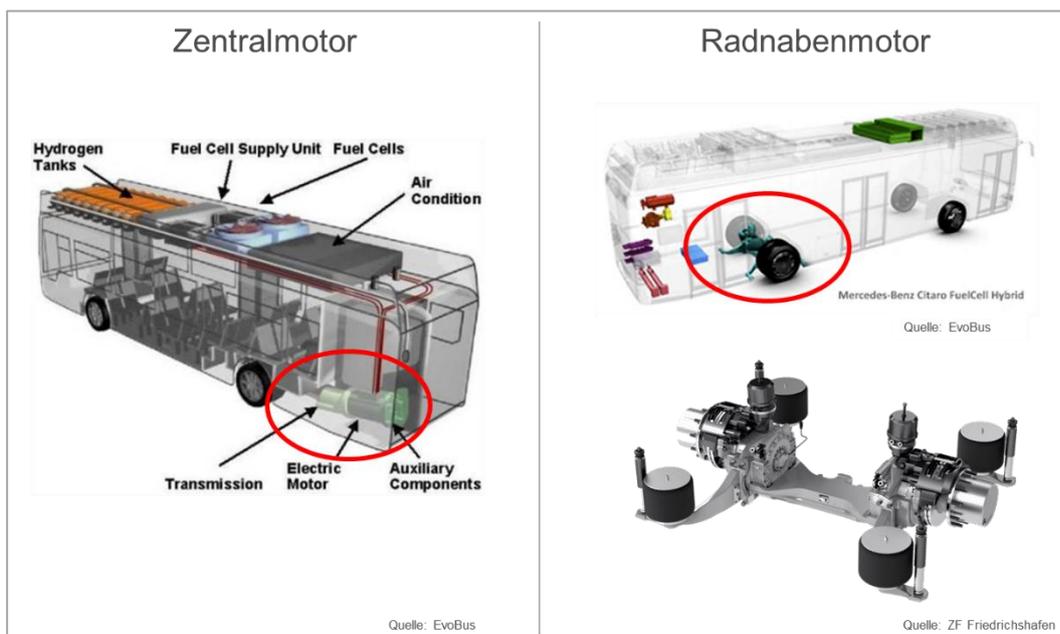


Abbildung 2: Zentralmotor vs. Radnabenmotor

Prinzipiell kann der Elektromotor als Zentralmotor ausgeführt oder auch als Radnabenmotor direkt in die Räder verbaut werden (siehe Abbildung 2). Radnabenmotoren haben den Vorteil des reduzierten Platzbedarfs und des höheren Wirkungsgrades, da mehrere Komponenten des klassischen Antriebsstranges (z.B. Differenzial, Kardanwelle etc.) entfallen. Im Vergleich zu den weiter verbreiteten karosseriefesten Zentralmotoren sind Radnabenmotoren jedoch wesentlich stärker Umwelteinflüssen und physikalischen Belastungen ausgesetzt. Außerdem verhält sich das extrem hohe Gewicht der Räder nachteilig, da es nur durch die Reifenluft gefedert wird. Solche ungefederten Massen, zu denen unter anderem auch Achsen, Stoßdämpfer und Bremsen gehören, werden üblicherweise möglichst geringgehalten, um eine präzise

und sichere Radführung sowie bestmöglichen Komfort gewährleisten zu können. Nichtsdestotrotz eröffnet der zusätzlich verfügbare Stauraum gerade bei Elektrobussen neue Möglichkeiten, da für den Energiespeicher ein nicht unerhebliches Volumen benötigt wird.

In Abbildung 3 ist der grundsätzliche Aufbau des elektrischen Antriebsstrangs dargestellt. Als Grundgerüst des Antriebsstrangs fungiert der Gleichstromzwischenkreis, der Versorger und Verbraucher mit Hilfe von Leistungselektronik zusammenführt. Diese wird benötigt, um zwischen unterschiedlichen Spannungsebenen transformieren zu können. Bspw. wandelt ein Gleichspannungswandler die deutlich höhere Gleichspannung (DC) aus dem Zwischenkreis in eine Gleichspannung mit niedrigerem Spannungsniveau zur Versorgung des 24 V-Bordnetzes um. Ähnlich wird ein Wechselrichter zur Ansteuerung des Elektromotors eingesetzt. Dieser wandelt den Gleichstrom aus dem Zwischenkreis in Wechselstrom (AC) um. Folglich werden zur Versorgung aller Nebenaggregate (Klimatisierung, Lenkhilfe, Licht etc.) entsprechende Stromrichter benötigt. Ein Spannungswandler zwischen Batterie und Zwischenkreis ist nicht zwingend erforderlich.

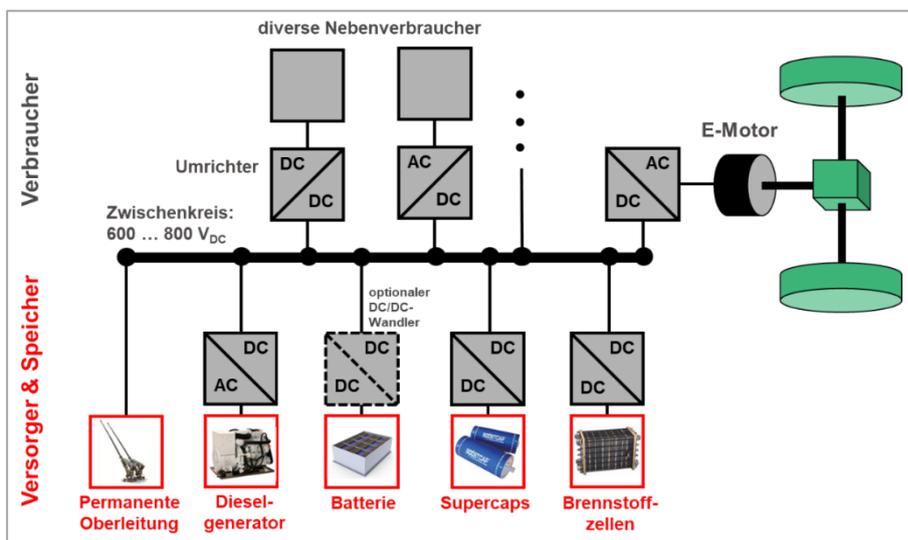


Abbildung 3: Antriebstopologie des Elektrobusses mit unterschiedlichen Versorgern

Um die Fahrzeugkomponenten mit elektrischer Energie zu speisen, können diverse Technologien – einzeln oder kombiniert – als Versorger herangezogen werden. Anhand der eingesetzten Versorger werden die unterschiedlichen Elektrobustypen maßgeblich charakterisiert. Knotenpunkt fast aller Elektrobustypen ist der elektrische Energiespeicher, auch als Traktionsbatterie bekannt. Der Begriff Elektrobuss wird häufig als Synonym für den Batteriebus verwendet. Im Nachfolgenden wird allerdings explizit zwischen Elektrobuss als Sammelbezeichnung bzw. Oberbegriff und Batteriebus als (spezifischer) Elektrobustyp unterschieden.

Der elektrische Antrieb ermöglicht es, den Energiespeicher im Fahrzeug im Bremsbetrieb wieder aufzuladen. Die sogenannte Rekuperation ist die Rückgewinnung von Energie durch das Abbremsen des Fahrzeugs. Beim Bremsen wird mechanische Energie wieder in elektrische umgewandelt, indem der Elektromotor in den Generatorbetrieb wechselt. Die gewonnene

Energie wird so in der Batterie gespeichert und kann daraus wiederum für die Traktion und den Nebenverbrauch entnommen werden. Rekuperation kann in Abhängigkeit des Streckenprofils und des Fahrverhaltens eine Reichweitenerhöhung um bis zu 40 Prozent ermöglichen [1] [2].

Zwar existieren auch Systeme, die die Notwendigkeit eines Energiespeichers umgehen, jedoch werden diese im Hinblick auf den aktuellen Stand der Technik und Forschung nur noch selten realisiert. Als Beispiel für einen Elektrobus ohne Energiespeicher dient der konventionelle Oberleitungsbus, der die elektrische Energie für den Antrieb des Elektromotors direkt aus der Oberleitung bezieht. Zudem werden aber auch batteriegespeiste Varianten angeboten, die ferner fahrdrahtlose Abschnitte befahren können. Weiterhin gibt es diverse Arten von Hybridbussen, wie Dieselhybrid- und Brennstoffzellenhybridbusse. Diese sind mit zwei unterschiedlichen Antriebssystemen ausgestattet. Neben der Batterie und dem Elektromotor sind die Fahrzeuge durch einen Verbrennungsmotor oder eine Brennstoffzelle zur Stromgenerierung komplementiert. Kommerziell verfügbare Systeme, bei denen Superkondensatoren (Supercaps) anstelle der Batterie zum Einsatz kommen, gehören eher der Ausnahme an, sind jedoch immer noch Teil gegenwärtiger Forschungen.

## 1.2 Energiespeicher

Der elektrische Energiespeicher bildet das Herzstück der meisten Elektrobusse. Er versorgt den Elektromotor und die Nebenaggregate mit Strom, ist aber auch maßgeblich für die Herausforderungen, die der Elektromobilität gegenüberstehen, verantwortlich.

Energiespeicher können auf eine hohe Energiedichte oder auf eine hohe Leistungsdichte optimiert werden. Grundlegend sind dabei die Auswahl der Chemie und der innere Aufbau des Speichers. Bei Hochleistungsanwendungen muss bspw. durch den inneren Aufbau eine hohe Wärmeabfuhr sichergestellt werden, wohingegen bei Hochenergiespeichern die Kühlung nur eine untergeordnete Rolle spielt. Mit zunehmender Energiedichte steigen daher die Reichweite und Gewichtseinsparungen. Die Leistungsdichte ist ein Kennwert für die Schnellladefähigkeit der Batterie. Höhere Leistungen könnten zwar auch über entsprechend große Hochenergiebatterien erreicht werden, der Einsatz von sehr hohen Batteriekapazitäten wird jedoch durch die resultierende Gewichtszunahme begrenzt.

In Abbildung 4 sind übliche Zellchemien aktueller Energiespeicher in einem sogenannten Ragone-Diagramm gegenübergestellt, das Energie- und Leistungsdichte in Beziehung zueinander setzt. Darin wird ersichtlich, dass sich Lithium-Ionen-Batterien mit einer Kombination aus hoher Energiedichte und ausreichender Leistungsdichte nach dem aktuellen Stand der Technik mitunter am besten für den Einsatz im Straßenverkehr eignen.

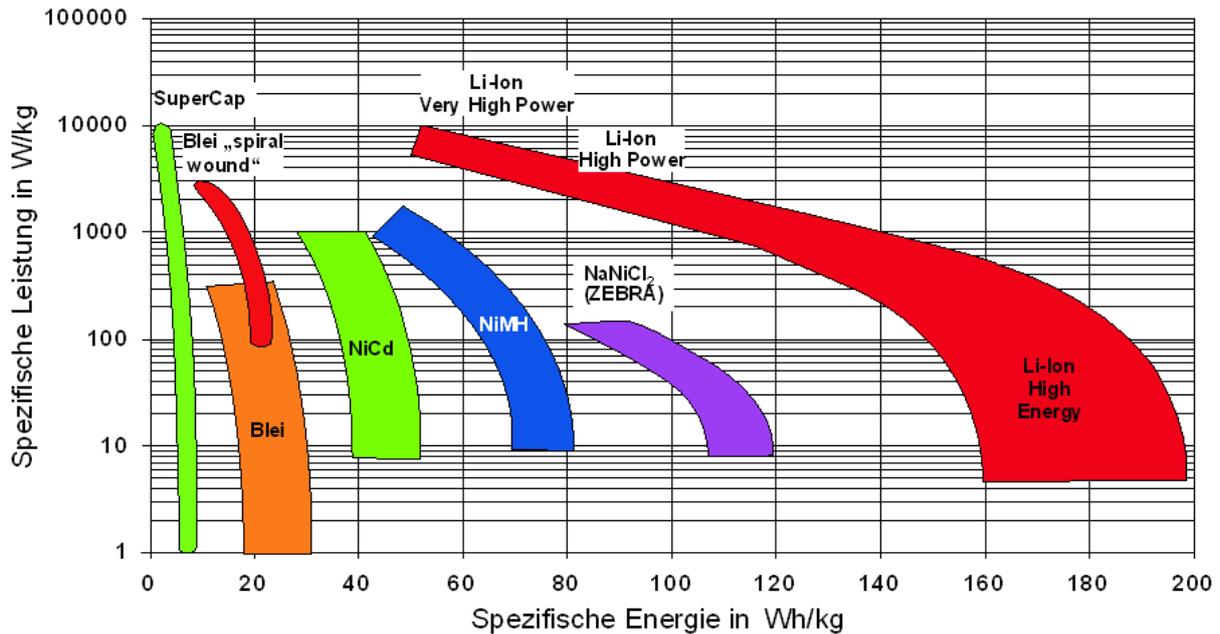


Abbildung 4: Ragone-Diagramm aktueller Batterietechnologien

### Lithium-Ionen-Batterien

Lithium-Ionen-Batterien sind der aktuelle Standard für Elektrobusse. „Lithium-Ionen“ ist allerdings nur der Oberbegriff für eine Reihe unterschiedlicher Zellchemien, welche sich in ihren technischen Parametern, Lebensdauern, Sicherheitsmerkmalen und Kosten unterscheiden. Die gängigsten Zellchemien sind NMC (Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide), LFP (Lithium-Eisenphosphat) und LTO (Lithium-Titanat). NMC-Zellen werden bspw. vom Batteriehersteller *Akasol* verbaut, dessen Systeme unter anderem in den *VDL* Elektrobusen in Köln eingesetzt werden. Viele chinesische Hersteller ebenso wie *Ebusco* und *Sileo* setzen auf LFP-Zellen, welche bedingt durch die Zellchemie eine geringere Energiedichte als NMC-Zellen aufweisen. LTO-Zellen haben im Vergleich die geringste Energiedichte, aber die höchste Leistungsdichte. Zellen dieses Typs werden unter anderem von *Linkker* oder *Solaris* für Elektrobuskonzepte mit Schnellladung verwendet.

Bei der Auslegung der Batterie ist zu beachten, dass nicht die gesamte installierte Kapazität der Batterie genutzt werden kann. Daher muss eindeutig zwischen installierter und nutzbarer Batteriekapazität unterschieden werden. Weiterhin reduziert sich mit der Nutzungsdauer der Batterie die Kapazität, bedingt durch die Alterung. Bei Lithium-Ionen-Zellen ist das Lebensdauerende (End-of-Life, EOL) für gewöhnlich durch einen Kapazitätsverlust von 20 Prozent im Vergleich zum Neuzustand (Begin-of-Life, BOL) definiert (siehe Abbildung 5). Der Kapazitätsverlust hat einen direkten Einfluss auf die Reichweite der Elektrobusse. Um die für den Linienbetrieb erforderliche Reichweite bis zum EOL gewährleisten zu können, hat die Auslegung der Batterie unter Berücksichtigung der verfügbaren Restkapazität am Lebensdauerende zu erfolgen.

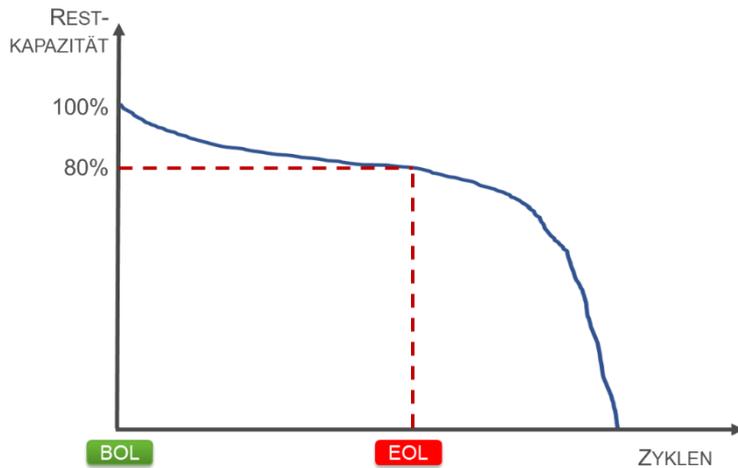


Abbildung 5: Exemplarischer Kapazitätsverlust einer Batteriezelle bedingt durch Alterung

Eine weitere Reserve muss vorgehalten werden, da die Randbereiche des Ladezustands einer Batterie nur begrenzt nutzbar sind (siehe Abbildung 6). Dies resultiert aus potenziellen Unterschieden im Ladezustand der einzelnen Zellen einer Serienschaltung. Dabei definiert die Zelle mit dem höchsten Ladezustand das Ende des Ladevorgangs und die Zelle mit dem niedrigsten Ladezustand das Ende des Entladevorgangs. Zellunterschiede werden in der Praxis durch Balancing-Systeme ausgeglichen. Die in Abbildung 6 gezeigten Reserven sind daher als konservative Abschätzung einer nicht perfekt ausgeglichenen Batterie zu verstehen.

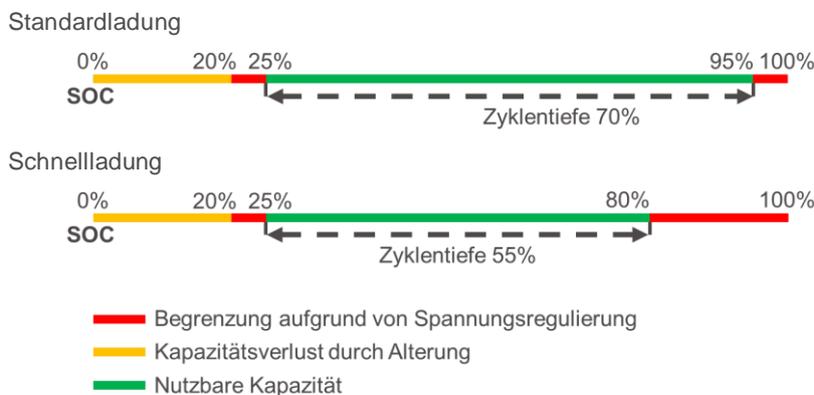


Abbildung 6: Beispiel für zulässige Betriebsbereiche der Batterie bei Schnell- und Standardladung

Die Schnellladung hat aufgrund der sehr hohen Ströme die Besonderheit, dass das obere Spannungslimit der Batterie schon bei einem SOC von ca. 80 Prozent erreicht wird. Anschließend verringert das Ladesystem die Stromzufuhr bei Konstanthaltung der Spannung, wodurch sich die Ladeleistung reduziert. Betriebsbereiche oberhalb von 80 Prozent werden bei der Schnellladung daher vermieden, so dass eine weitere Begrenzung des Ladezustands resultiert. Somit stehen abzüglich des Kapazitätsverlusts und der Randbereichsbegrenzung bei Standardladung lediglich 70 bis 75 Prozent der initial installierten Batteriekapazität und bei Schnellladung ca. 55 bis 60 Prozent zur Verfügung.

## **Supercaps (Doppelschichtkondensatoren)**

Anstelle einer Traktionsbatterie können auch sogenannte Supercaps zur Energiespeicherung eingesetzt werden. Im Gegensatz zum chemischen Speicherungsprozess der Batterie wird dabei die elektrische Energie durch ein elektrisches Feld im Kondensator gelagert. Wie im Ragone-Diagramm zu sehen ist (siehe Abbildung 4), sind Supercaps durch sehr niedrige Energiedichten charakterisiert. Während sie Energiedichten von ca. fünf bis zehn Prozent im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien vorweisen, übersteigen ihre Leistungsdichten die der üblich eingesetzten Batterietypen um das 20 bis 100-fache. Die Speicherkapazitäten von Supercaps alleine reichen daher nicht aus, um geeignete Distanzen überbrücken zu können. Außerdem ermöglicht ihre schnelle Selbstentladung keine Energiespeicherung über längere Zeiten hinweg. Aufgrund ihrer Lebensdauer und Zyklenfestigkeit eignen sich Supercaps jedoch als Zwischenspeicher für den Einsatz in Hybridfahrzeugen, in denen hohe Leistungsdichten benötigt werden.

## 1.3 Nebenverbraucher und Klimatisierungskonzepte

Bei der Auslegung der Batterie und Ladeinfrastruktur ist nicht nur die für die Traktion benötigte Energie entscheidend. Die Nebenverbraucher (u.a. Lenkhilfe, Kompressor, Fahrgastinformation) und insbesondere das Heiz- und Kühlsystem (HLK) können bei vollständiger Versorgung mit elektrischer Energie einen erheblichen Anteil des Energiebedarfs ausmachen. Dabei ist der Verbrauch eines vollelektrischen HLK-Systems stark von der Jahreszeit abhängig. Im Winter ist der Hauptverbraucher aufgrund des hohen Wärmebedarfs die vollelektrische Heizung. Während bei konventionellen Dieselnissen die Abwärme des Verbrennungsmotors zur Beheizung des Innenraums dient, ist dies bei Elektrobussen nicht oder z.B. bei Hybridbussen nur teilweise möglich.

Um die für den Heizbedarf bereitzustellende elektrische Energie zu begrenzen, kann der Einsatz eines fossilen Zusatzheizers von Vorteil sein. Dieser ersetzt die elektrische Heizung und löst ggf. eine verbaute Wärmepumpe bei der Unterschreitung eines definierten Temperaturwertes ab, da diese bei tieferen Temperaturen weniger effizient arbeitet. Dadurch geht der Heizenergiebedarf nicht oder nur teilweise zulasten der Batterie. Während des Verbrennungsprozesses, bei dem fossile Energieträger (z.B. Diesel oder Bio-Ethanol) als Treibstoff für den Zusatzheizer verwendet werden, entstehen Emissionen. Die jährlichen Schadstoffmengen sind jedoch deutlich geringer im Vergleich zum Einsatz konventioneller Dieselnisse.

## 1.4 Umweltauswirkungen

Die verschiedenen Antriebssysteme tragen auf unterschiedliche Weise zu Emissionen bei. Im Gegensatz zum Verbrennungsmotor ermöglicht der Elektromotor einen lokal emissionsfreien Linienbetrieb, d.h. keine innerstädtische Luftverschmutzung durch Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) und Fein-

staub (Particulate Matter, PM). Jedoch können global wirksame Emissionen wie das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) durch die Energieträgerbereitstellung oder Energieerzeugung freigesetzt werden. Bei der Nutzung von Ökostrom aus regenerativen Quellen entfällt dieser Nachteil, so dass diese Art der Versorgung in jedem Falle zu bevorzugen ist.

Der Einsatz eines Verbrennungsmotors, ob als direkter Antrieb, Stromerzeuger oder Nebenaggregat, führt neben den lokal wirksamen Schadstoffen zu 2,63 kg global wirkendem CO<sub>2</sub> pro Liter Diesel durch den Verbrennungsvorgang. Zudem ist die Berücksichtigung eines ökologischen Fußabdrucks von 0,34 kg CO<sub>2</sub> pro Liter Diesel für die Bereitstellung des Kraftstoffs (Raffinerie und Transport) notwendig, um einen realistischen Vergleich mit Elektrobussen zu ermöglichen.

Aus sozioökonomischer Sicht wird mithilfe des elektrischen Antriebs zusätzlich eine deutliche Reduzierung des Lärms gegenüber Dieselnissen erreicht. Studien haben gezeigt, dass der vollelektrische Betrieb zu einer Halbierung des subjektiv wahrgenommenen Lärmpegels führen kann [3] [4].

## 1.5 Batteriebus

Der Batteriebus definiert die klassische Variante des Elektrobusses und ist durch eine vergleichsweise geringe Anzahl erforderlicher Komponenten charakterisiert. Der Elektromotor des Batteriebusses wird ausschließlich durch elektrische Energie des Energiespeichers (Traktionsbatterie) versorgt (siehe Abbildung 7). Die Batterie ist damit auch für die vollständige Versorgung der Nebenverbraucher zuständig, sofern kein zusätzlicher fossiler Heizer eingesetzt wird. Das Nachladen der Batterie erfolgt über entsprechende Ladesysteme sowie über Rekuperation.

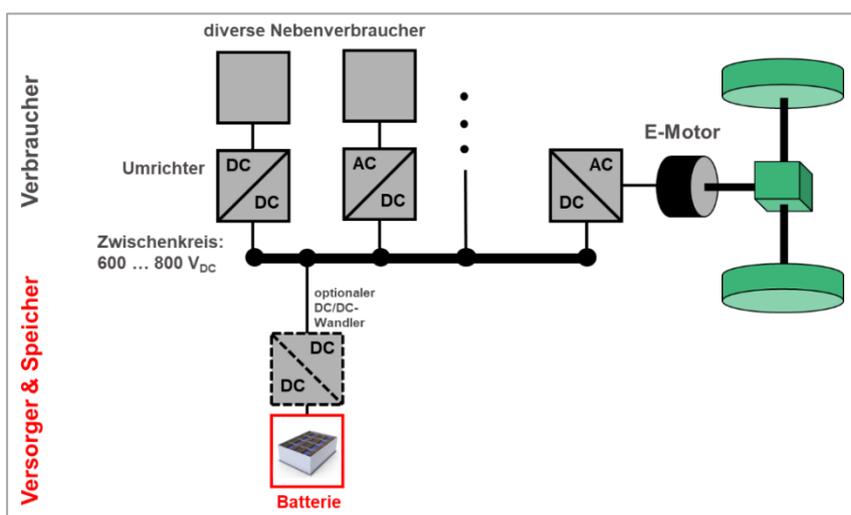


Abbildung 7: Antriebstopologie des Batteriebusses

Batteriebusse dominieren den aktuellen Elektrobustmarkt. Der Einsatz der Fahrzeuge bringt allerdings neue Herausforderungen mit sich. Neben den wirtschaftlichen Herausforderungen stellen vor allem die technische Auslegung und die Verknüpfung der Ladestrategie mit der betrieblichen Umlaufplanung entscheidende Hürden dar.

### 1.5.1 Ladekonzepte

Aufgrund der begrenzten Reichweite von Batteriebussen ist ein identisches Betriebsmodell wie bei Dieselnissen häufig nicht möglich. Trotz des stetigen Fortschritts in der Batterieentwicklung reichen die Energiekapazitäten meist nicht aus, um den täglichen Umlaufplan eines Dieselnisses zu befahren, wodurch ein zwischenzeitliches Nachladen erforderlich wird. Die nachfolgend beschriebenen Ladekonzepte unterscheiden sich anhand ihrer Nachladestrategie, welche weiterhin die technische Ausgestaltung der Fahrzeuge und insbesondere die Wahl des Batteriesystems (Hochenergie oder Hochleistung) bedingt.

#### **Depotladung**

Die Depotladung bezeichnet das ausschließliche Nachladen im Betriebshof. Die Nachladung erfolgt größtenteils über Nacht, falls notwendig auch während der Betriebszeiten. Dieses Konzept sieht keine Installation von Ladeinfrastruktur an Haltestellen oder sonstigen öffentlichen Orten vor. Die Batterien können zudem mit vergleichsweise niedrigen Leistungen geladen werden, was eine Optimierung auf besonders hohe Energiedichten ermöglicht.

Um ein häufiges Anfahren des Betriebshofes zum Nachladen zu vermeiden, werden für längere Umläufe entsprechend große Batterien benötigt. Dies wirkt sich bezüglich des Kostenpunkts nachteilig gegenüber Konzepten aus, die mit kleineren Batterien umgesetzt werden können. Aufgrund von Restriktionen bezüglich des Maximalgewichts von Linienbussen kann eine sehr hohe Batteriekapazität außerdem zur Reduzierung der zugelassenen Fahrgastanzahl führen.

#### **Gelegenheitsladung**

Die Gelegenheitsladung ist definiert durch das Nachladen der Batterie während der Aufenthalte an Haltestellen. Aufgrund der längeren Stillstandszeiten bieten sich hier insbesondere Endhaltestellen an. Dennoch ist eine hohe Ladeleistung von meist über 300 kW erforderlich. In Abhängigkeit vom Takt und dem Streckenprofil ist der Betrieb häufig sogar ohne Fahrzeugmehrbedarf möglich.

Die Integration von Ladesystemen im öffentlichen Raum ist jedoch oft nicht unproblematisch, bspw. aufgrund von Platzmangel oder aufwendigen Baumaßnahmen. Nicht zu unterschätzen ist ebenfalls die geringere Flexibilität von Gelegenheitsladern bei abweichenden Linienführungen. Eine regelmäßige Frequentierung der Endstellen mit Ladeinfrastruktur muss gewährleistet werden.

## Fazit

Letztendlich lässt sich die Wahl der für den Betrieb optimalen Ladestrategie nicht pauschalisieren, da sie maßgeblich von Umlaufplan und Streckenprofil abhängt. Während die Depotladung den flexibleren Einsatz ermöglicht, kann sie mit einem höheren Fahrzeugbedarf und weiteren Leerfahrten verbunden sein. Die zusätzlichen Kosten für die Fahrzeug- und Batterieanschaffung sowie für die Fahrzeit können die zusätzlichen Infrastrukturkosten der Gelegenheitsladung dabei deutlich übersteigen. Die Ermittlung eines geeigneten Ladekonzepts muss daher immer im Hinblick auf die lokalen Gegebenheiten erfolgen.

### 1.5.2 Ladeinfrastruktur

Die Ladeinfrastruktur spielt eine entsprechend wichtige Rolle bei der Erhöhung der täglichen Reichweite von Batteriebussen. In diesem Kontext wird zwischen Standard- und Schnellladern unterschieden. Schnelllader werden üblicherweise bei der Gelegenheitsladung für das Nachladen an Endhaltestellen installiert. Diese sind durch Leistungen von über 300 kW geprägt und ermöglichen dadurch eine zeitige Wiederaufnahme des Fahrdienstes. Dem stehen die Standardlader mit geringeren Leistungen von bis zu 150 kW gegenüber. Diese werden hauptsächlich in Betriebshöfen eingesetzt und sind für das Konzept der Depotladung maßgebend, bei dem für das Nachladen der Batterie eine längere Stillstandzeit gegeben ist.

Zur Umsetzung dieser beiden Varianten sind verschiedene Systeme am Markt erhältlich. Konduktive Systeme sind dabei am weitesten verbreitet. Anders als das induktive Laden, welches durch die berührungslose Energieübertragung ausgezeichnet ist, erfolgt das konduktive Laden über ein Kabel. Die kabelgebundene Energieübertragung kann wiederum über eine Steckverbindung oder automatisiert über einen Pantographen erfolgen.

#### Konduktives Laden (manuell)

Die Ladung über eine Steckverbindung stellt die klassische Variante der Energieübertragung dar. Sie eignet sich aufgrund der geringeren Leistungen primär für den Einsatz im Betriebshof. Das Ladegerät kann dabei sowohl in einer externen Ladestation als auch im Fahrzeug selbst montiert werden.

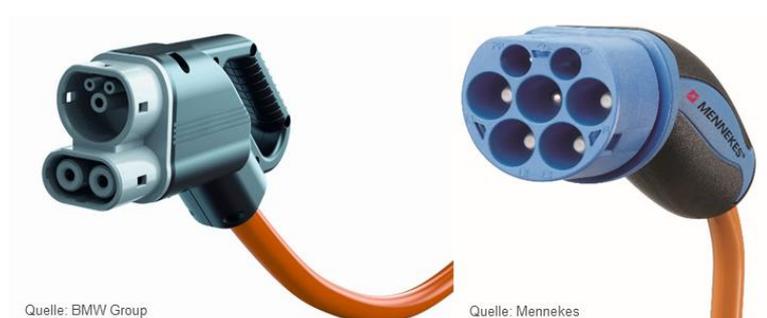


Abbildung 8: Konduktives Laden via Plug-In (Combo-2 & Typ-2 Stecker)

Aktuell existiert im Busbereich noch kein Standard bezüglich der eingesetzten Systeme. Die Hersteller orientieren sich allerdings am in Abbildung 8 gezeigten Combo-2 Stecker, auch CCS-Stecker (Combined Charging System) genannt. Die für die Ladung genutzten Kommunikationsprotokolle zwischen Bus und Ladegerät weichen aber teilweise von der PKW-Norm ab, so dass bei manchen Herstellern nur herstellereigene Ladegeräte genutzt werden können. Die Marktentwicklung der letzten Jahre hat jedoch gezeigt, dass insbesondere der Combo-2 Stecker sowie die ISO-Norm 15118 von den Herstellern verwendet werden.

### Konduktives Laden (automatisiert)

Bei der Schnellladung erfolgt die konduktive Energieübertragung üblicherweise durch die automatisierte Kontaktherstellung über einen Pantographen (siehe Abbildung 9). Der Pantograph kann sowohl auf dem Fahrzeugdach als auch an einem Lademast angebracht werden. Solche Systeme eignen sich zur Installation an Haltestellen, um während des Betriebs mit hohen Leistungen innerhalb einer kurzen Pausenzeit laden zu können.



Abbildung 9: Konduktives Laden via Pantographen

### Induktives Laden

Mittels Induktion wird eine automatisierte Energieübertragung möglich, ohne physischen Kontakt zwischen Ladestation und Fahrzeug herstellen zu müssen. Eine straßenseitige Primärspule erzeugt durch die Zufuhr von Strom ein magnetisches Feld, was durch eine fahrzeugseitige Sekundärspule wiederum in elektrische Energie gewandelt und in der Batterie gespeichert wird. Aktuell können Leistungen von bis zu 200 kW bei einem Wirkungsgrad von bis zu 90 Prozent erreicht werden. Die tatsächliche Ladeleistung und der Wirkungsgrad sind jedoch abhängig von Umweltbedingungen sowie Position und Entfernung der zwei Spulen. Aufgrund der vergleichsweise hohen Kosten und der Langfristigkeit der baulichen Maßnahmen an den Endhaltestellen ist die induktive Ladung bislang nur wenig verbreitet.

### 1.5.3 Marktübersicht

Im Linienverkehr werden Busse verschiedener Bauformen eingesetzt. Tabelle 1 beinhaltet vier typische eingesetzte Fahrzeugvarianten, die auch als Batteriebusse verfügbar sind. Doppeldeckerbusse sind nicht aufgeführt, da bisher kein Hersteller vergleichbare zweistöckige Batteriebusse baut.

Bauform	Fahrzeuglänge
Minibus	< 8 m
Midibus	8 m bis 10,5 m
Solobus	ca. 12 m
Gelenkbus	ca. 18 m

Tabelle 1: Typische Bauformen von Batteriebussen im Linienverkehr

Herkunft	Batteriebus-Hersteller	Batteriesystem-Hersteller	Herkunft	Batteriebus-Hersteller	Batteriesystem-Hersteller
<b>Belgien</b>	Van Hool		<b>Portugal</b>	CaetanoBus	
<b>China</b>	BYD Ebusco* Hunan CRRC	BYD Ebusco* Microvast Winston Battery	<b>Spanien</b>	Irizar	
<b>Deutschland</b>	Bozankaya / Sileo* EvoBus MAN**	Akasol BFFT BMZ Bozankaya*	<b>Schweden</b>	Hybricon Volvo	Hybricon
<b>Finnland</b>	Linkker		<b>Schweiz</b>	Carrosserie Hess	ABB Leclanche
<b>Frankreich</b>	Bluebus Heuliez Bus	BlueSolutions Forsee Power SAFT	<b>Tschechien</b>	Skoda SOR	EVC
<b>Italien</b>	Rampini	FIAMM	<b>Türkei</b>	Bozankaya / Sileo* Otokar Temsas	
<b>Japan</b>		Mitsubishi	<b>UK</b>	Alexander Dennis Optare	
<b>Niederlande</b>	Ebusco* VDL		<b>Ungarn</b>	evopro Bus	
<b>Polen</b>	Solaris Ursus Bus	Solaris	<b>USA</b>		AltairNano Impact Valence
*Multinationale Unternehmen **Erste Batteriebusse sind angekündigt für 2020					

Tabelle 2: Übersicht der Anbieter von Batteriebussen und Batteriesystemen im europäischen Markt [5]

Batteriebusse werden auf dem europäischen Markt von verschiedenen Herstellern angeboten. Die Verfügbarkeit ist regional unterschiedlich. Neben etablierten Herstellern mit einem bestehenden Dieselbusgeschäft, wie bspw. *VDL* und *Volvo*, gibt es auch neue Unternehmen, die ausschließlich Elektrobusse anbieten, wie zum Beispiel *Ebusco* und *Sileo*. *EvoBus* als euro-

päischer Marktführer im Omnibusbereich hat seine ersten Batteriebusse Ende 2018 ausgeliefert. MAN hat seinen Markteintritt für Mitte 2020 angekündigt. Tabelle 2 listet Hersteller von Batteriebussen und -systemen auf, die auf dem europäischen Markt agieren und Midi-, Solo- und/oder Gelenkbusse fertigen.

#### 1.5.4 Kosten

Die Investitionskosten bei der Beschaffung von Batteriebussen können in Abhängigkeit der Fahrzeuggröße auf die nachfolgenden Richtwerte abgeschätzt werden. In den angegebenen Preisspannen ist die Batterie bereits inkludiert, Ladeinfrastruktur ist nicht enthalten.

Minibus	Midibus	Solobus	Gelenkbus
ca. 200.000 – 280.000 €	ca. 400.000 – 550.000 €	ca. 500.000 – 650.000 €	> 800.000 €

Tabelle 3: Beschaffungspreise für Batteriebusse in Abhängigkeit der Fahrzeuggröße

Die tatsächlichen Kosten ergeben sich anhand von Batteriesystem, Ausstattung, Design, Hersteller, Bestellmenge, vereinbarten After-Sales-Leistungen, Garantien etc. Die Kosten für die Ladeinfrastruktur bestehen aus den Aufwänden für Ladegeräte, Koppelsystem/Stecker, Netzanschluss, evtl. erforderliche bauliche Maßnahmen etc. So resultiert z. B. für eine 50-kW-Ladestation im Depot ein Gesamtpreis von ca. 40.000 €, für eine 300-kW-Schnellladestation an einer Endhaltestelle sind ca. 240.000 € einzukalkulieren.

### 1.6 Dieselhybridbus

Der Dieselhybridbus ist sowohl mit einem Diesel- als auch mit einem Elektromotor ausgestattet. Der Verbrennungsmotor kann dabei das elektrische Antriebssystem mit Strom versorgen oder selbst direkt als Antrieb dienen. Dabei wird zwischen parallelen und seriellen Hybridantriebssystemen unterschieden.

#### **Serieller Hybridantrieb**

Im Serienhybrid sind Verbrennungsmotor und Antriebsachse mechanisch nicht miteinander verbunden (siehe Abbildung 10). Der Verbrennungsmotor treibt ausschließlich einen elektrischen Generator zur Stromerzeugung an, der Elektromotor und Batterie mit Energie versorgt. Die Batterie wird dabei für Beschleunigungs- und Bremsvorgänge genutzt, wenn höhere Leistungen benötigt werden.

Die serielle Technologie wird unter den Hybridantrieben bevorzugt bei Linienbussen eingesetzt. Durch das häufige Anfahren und Abbremsen sind hier die potenziellen Kraftstoffeinsparungen am höchsten, da auch die Energierückgewinnung durch Rekuperation einen signifikanten Anteil an der Antriebsenergie ausmacht. Streckenprofile, die mit einer weniger effizienten Rekuperation verbunden sind, könnten aufgrund der Wirkungsgradketten im Vergleich zu rein

konventionellen Antrieben sogar zu einem Kraftstoffmehrverbrauch führen. Das zusätzliche Antriebssystem wirkt sich zudem negativ auf Gewicht und Platzbedarf aus. Der vollelektrische Antriebsstrang ermöglicht jedoch theoretisch eine spätere Umrüstung zum vollelektrisch betriebenen Batteriebus, was zum Beispiel von der ASEAG in Aachen demonstriert wurde.

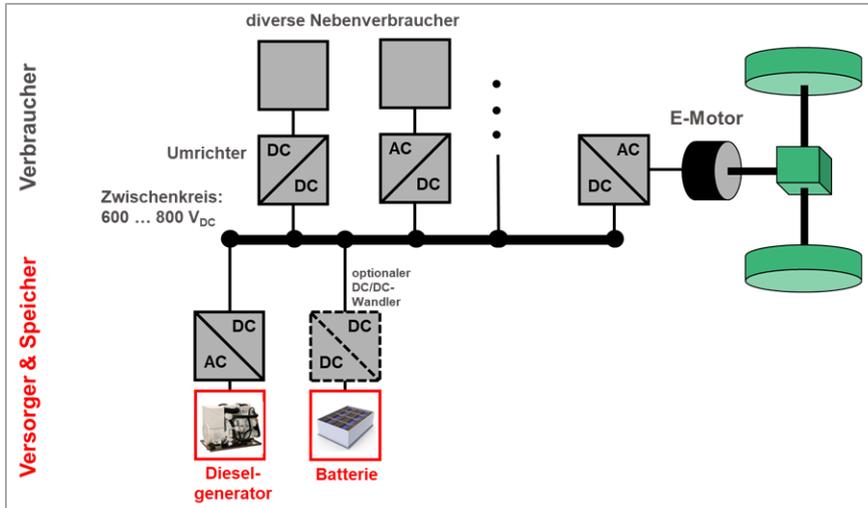


Abbildung 10: Antriebstopologie des seriellen Hybridbusses

### Paralleler Hybridantrieb

Der parallele Hybridbus ist kein klassischer Elektrobus, da der Verbrennungsmotor selbst den Antrieb des Fahrzeugs übernimmt (siehe Abbildung 11). Elektromotor und Batterie dienen hier nur als eine Art Hilfsantrieb und arbeiten mechanisch parallel zum Verbrennungsmotor, wodurch sich die Kräfte und Drehmomente der beiden Motoren addieren.

Durch den konventionellen Antrieb des Fahrzeugs werden Komponenten benötigt, die bei klassischen Elektrofahrzeugen entfallen, wie Getriebe und Kupplung. Dies wiederum wirkt den Gewichts- und Kostenvorteilen entgegen.

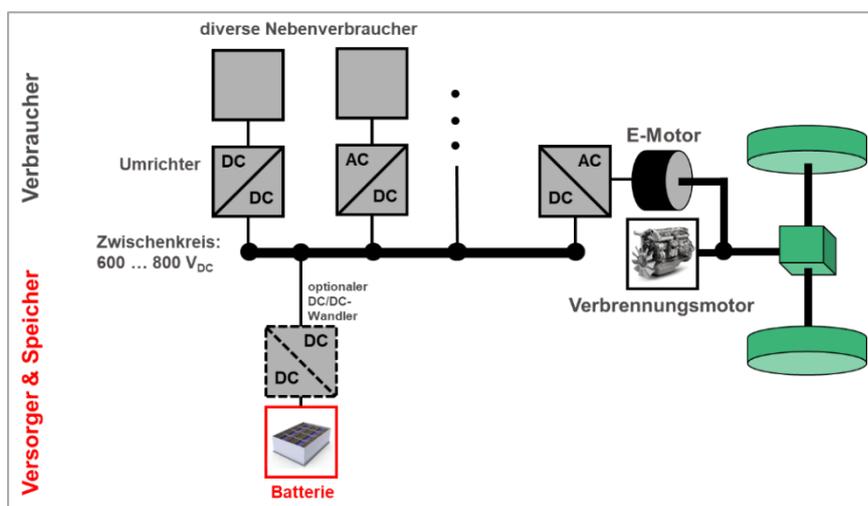


Abbildung 11: Antriebstopologie des parallelen Hybridbusses

### **Plug-In-Hybrid**

Aufgrund der kleinen Batterie des Hybridbusses, die oft lediglich auf die Aufnahme von Bremsenergie dimensioniert ist, sind die rein elektrischen Fahrtabschnitte stark begrenzt. Im Falle des Plug-In-Hybrids kommen größere Batterien zum Einsatz. Diese werden nicht mehr nur durch die Energie aus Verbrennungsvorgang und Rekuperation nachgeladen, sondern auch an Ladestationen an den Endhaltestellen einer Linie (identisch zur Gelegenheitsladung). Bei typischen Batteriekapazitäten für Plug-In-Hybridbusse von ca. 20 kWh sind dadurch rein elektrische Reichweiten von zehn km möglich. Dieses Antriebssystem führt zwar zu höheren Kraftstoff- und Emissionseinsparungen, ist jedoch auch deutlich kostenintensiver durch die benötigte Ladeinfrastruktur.

### **Fazit**

Der Einsatz von Hybridbussen erlaubt aufgrund des Verbrennungsmotors einen flexiblen Betrieb wie bei konventionellen Dieselnbussen. Im Sinne der Nachhaltigkeit können seriell und parallel angetriebene Hybridbusse jedoch nicht die Effizienz von Batteriebusen erreichen. Der Plug-In-Hybrid kann bei rein elektrischem Betrieb vergleichbar umweltschonende Effekte vorweisen wie ein Batteriebus, ist jedoch auch durch entsprechend hohe Kosten gekennzeichnet. Daher bietet der Plug-In-Hybrid lediglich Übergangslösungen für diejenigen Umlaufpläne an, die nicht oder nur unter erheblichem Aufwand durch Batteriebusse bedient werden können. Wegen dieser Positionierung hält sich das Marktangebot von Dieselhybridbussen jedoch in Grenzen.

## **1.7 Oberleitungsbus**

Klassische Oberleitungsbusse, auch Trolleybusse genannt, beziehen ihre Antriebsenergie während des gesamten Betriebs permanent über eine Oberleitung (siehe Abbildung 12). Ein relativ kleiner Energiespeicher ist als Notstromversorger vorgesehen und soll dem Fahrzeug in diesem Fall eine kurze von der Oberleitung entkoppelte Fahrt ermöglichen. Diese Technologie kommt in der Form nur noch in wenigen deutschen Städten zum Einsatz.



Quelle: Trolleyemotion

Abbildung 12: Oberleitungsbus

Im Zuge der jüngsten Technologieentwicklungen werden nun Konzepte mit größeren Batterien, welche nicht nur als Notfahreinrichtung dienen sollen, relevanter (siehe Abbildung 13). Der Oberleitungsbus ähnelt damit einem Batteriebus mit kontinuierlicher Lademöglichkeit. Längere oberleitungsfreie Strecken können allein mit der Energie aus der Batterie gefahren werden, um dann während der leitungsgekoppelten Abschnitte die Batterie wieder nachzuladen. Durch diese Betriebsweise kann die Installation von Oberleitungen an kritischen Stellen, wie zum Beispiel Kreuzungsbereichen, vermieden werden.

Die häufige Nachladung der Batterie erlaubt einen unterbrechungsfreien Betrieb. Die Abhängigkeit von der Oberleitung und die begrenzte Reichweite im Batteriebetrieb wirken sich jedoch negativ auf die Flexibilität der Busse aus. Weiterhin sind nicht nur die Oberleitungssysteme mit einem hohen Investitionsbedarf verbunden, sondern auch die Fahrzeuganschaffung beläuft sich aufgrund der zusätzlichen elektrischen Isolierung auf hohe Kosten. Die Errichtung der langfristig bestehenden Ladeinfrastruktur, welche einen Großteil des Straßenraums abdeckt, kann zudem das Stadtbild negativ beeinflussen.

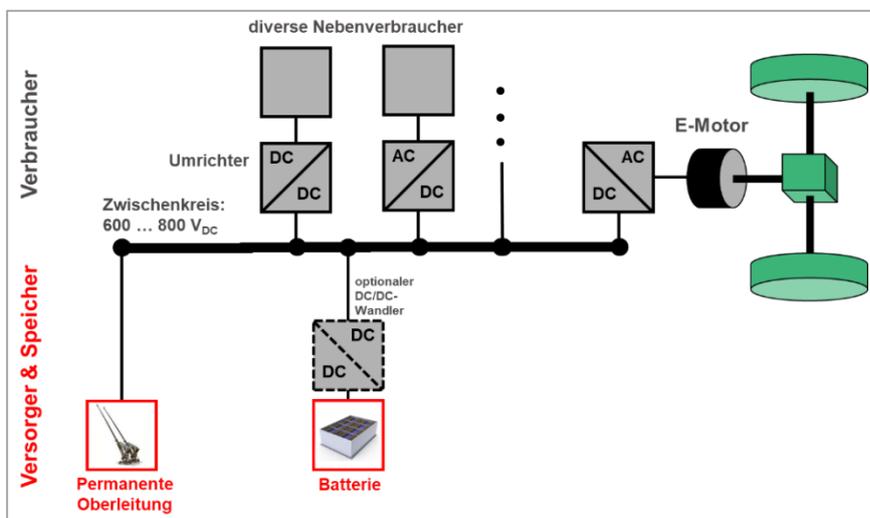


Abbildung 13: Antriebstopologie des batteriebetriebenen Oberleitungsbus

## 1.8 Brennstoffzellenbus

Der Antrieb des Brennstoffzellenbusses ist ähnlich zu dem des seriellen Dieselhybridbusses aufgebaut (vgl. Kapitel 1.6). Anstelle des Verbrennungsmotors übernimmt die Brennstoffzelle die Energieerzeugung (siehe Abbildung 14), welche Wasserstoff in Wasser und elektrische Energie umwandelt. Die Batterie fungiert zum einen als Speicher für Bremsenergie und zum anderen als Energiepuffer für die Brennstoffzelle, so dass diese weniger dynamisch betrieben werden muss.

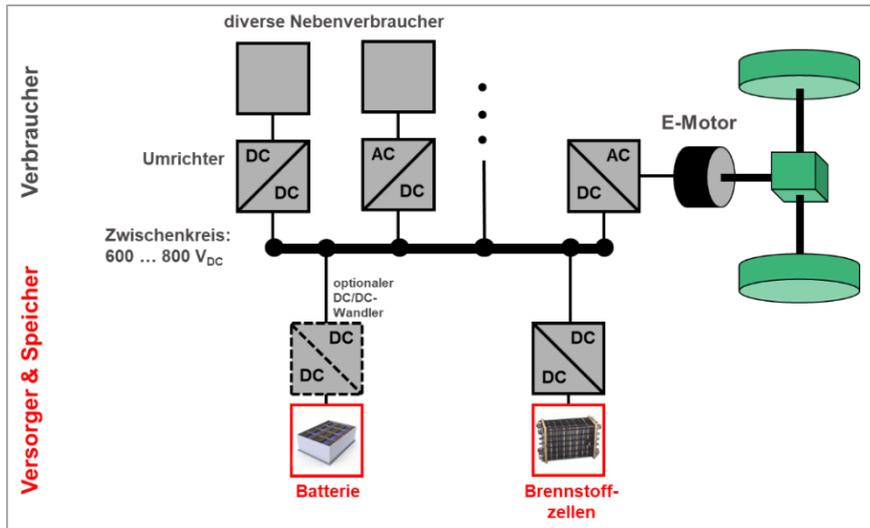


Abbildung 14: Antriebstopologie des Brennstoffzellenbusses

Mit Reichweiten von ca. 300 km können Brennstoffzellenbusse nahezu analog zu Dieselnissen betrieben werden. Diese Distanz gewährleistet in vielen Fällen einen unterbrechungsfreien und flexiblen Einsatz. Zudem kann der Wasserstofftank in einer ähnlich kurzen Zeit vollgetankt werden wie beim Dieselniss. Den betrieblichen Vorteilen stehen jedoch wirtschaftliche Nachteile (insbesondere durch den Elektrolyseprozess zur Wasserstofferzeugung; vgl. Kapitel 1.8.2) sowie die nicht unerheblichen Infrastrukturaufwendungen für die Wasserstofftankstelle gegenüber.

### 1.8.1 Fahrzeugkonzepte

Das Marktangebot von Brennstoffzellenfahrzeugen ist stark eingeschränkt und wird zurzeit nur von wenigen Herstellern angeboten. Zwei Konzepte, die hierbei relevant sind, ist zum einen der sogenannte „Brennstoffzellenhybridbus“ und zum anderen der „Batteriebus mit Brennstoffzellen-Range-Extender“.

### **Brennstoffzellenhybridbus**

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 Energie für die Traktion wird dabei primär aus dem Wasserstofftank bezogen. Aktuell werden Brennstoffzellenhybridbusse nur von einzelnen Herstellern wie bspw. *Van Hool* vertrieben. *Solaris* hat ebenfalls einen Brennstoffzellenbus für 2020 angekündigt.

### **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 BZ-RE ist, dass, zusätzlich zur Möglichkeit der Wasserstoffbetankung, Ladeinfrastruktur für das Nachladen der Batterie errichtet werden muss. Aktuell ist das Angebot auf dem Elektrobustmarkt für den BZ-RE stark eingeschränkt. *EvoBus* hat ein solches Konzept für den serienreifen Vertrieb für 2022 angekündigt.

## 1.8.2 Wasserstoffbereitstellung

Der Einsatz von Brennstoffzellenbussen erfordert die Bereitstellung von Wasserstoff, dessen zentrale Elemente zum einen die Art der Erzeugung, zum anderen der Wasserstoffbezug sind. Abhängig von der Vorgeschichte unterscheidet man zwischen zwei Arten von Wasserstoff, die direkt den ökologischen Fußabdruck bestimmen. Unter der Maßgabe einer zu erzielenden CO<sub>2</sub>-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, sogenannter „grauer“ Wasserstoff. Nebenprodukte dieses Prozesses sind allerdings global wirksame Emissionen wie CO<sub>2</sub>; mengenmäßig vergleichbar mit der Verbrennung eines fossilen Energieträgers.

Der Bezug bzw. das Nachtanken des Wasserstoffs kann in unterschiedlichen Varianten erfolgen. Die technisch einfachste Lösung ist das Nachtanken an einer externen Tankstelle. Die Errichtung der gesamten Infrastruktur sowie der Betrieb der Tankstelle werden dabei durch einen externen Betreiber durchgeführt. Dem aktuellen Betrieb der Dieselsebusse ähnelnd, erfolgen dann nach jedem Betriebstags zusätzliche Tankfahrten, um die benötigte Menge an Wasserstoff für den nächsten Tag nachzutanken. Diese Variante wird einiger Orts bereits umgesetzt bspw. von der *RVK* in Köln und dem Tankstellenbetreiber *Air Liquide*, der eine Wasserstofftankstelle im Kölner Umland (Stadt Frechen) bereitstellt.

Neben der Variante, die Fahrzeuge an einer externen Tankstelle nachzutanken, besteht ebenfalls die Möglichkeit, eine eigene Tankstelle zu errichten; sofern ausreichend Fläche für die Errichtung der Anlage zur Verfügung steht. Abbildung 15 zeigt die schematische Zeichnung einer Wasserstofftankstelle für zehn Busse. Die Tankstelle besteht (neben dem LH<sub>2</sub>-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<sup>2</sup>. Für höhere Tankkapazitäten werden zusätzliche Druckbehälter und Kompressoren benötigt, was in einem zusätzlichen Flächenbedarf resultiert. Nachteile einer eigenen Tankstelle sind der Betrieb und die Wartung einer solchen. Hierfür müssen Kompetenzen aufgebaut werden, was zu zusätzlichen Kosten und Komplexitäten führt.

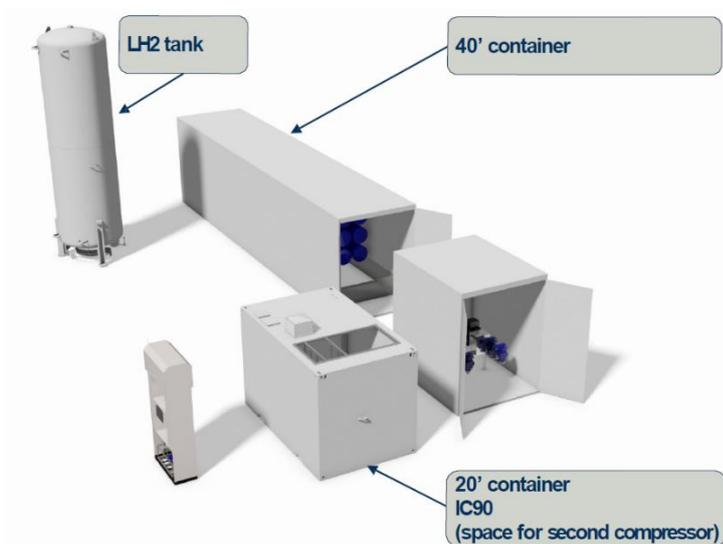


Abbildung 15: Schematische Darstellung einer Wasserstofftankstelle für 10 Busse [6]

Die Versorgung der Tankstelle erfolgt durch Wasserstoff, der mittels Elektrolyse hergestellt wird („grüner“ Wasserstoff). Dieser kann sowohl in einer externen als auch in einer eigenen Anlage erzeugt werden. Extern erzeugter Wasserstoff kann dabei entweder im gasförmigen (CGH<sub>2</sub>-Anlieferung), oder flüssigen (LH<sub>2</sub>-Anlieferung) 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 [7]. Bei dem Verbrauch eines Solobusses von 8 bis 9 kg H<sub>2</sub> pro 100 km und einer täglichen Fahrleistung von 300 km entspricht dies dem Tagesbedarf von ca. 30 Solobussen. Erheblich größere Mengen können bei einer Anlieferung im flüssigen Zustand realisiert werden. Die Obergrenze liegt hier bei ca. 3,5 t, was einem Tagesbedarf von 130 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 bislang noch keinen Einzug in den ÖPNV-Sektor gehalten und werden von Branchenexperten auch nicht favorisiert [8].

Alternativ zur Anlieferung kann der Wasserstoff auch vor Ort („on-site“) erzeugt werden, wodurch der sehr energieintensive Verflüssigungsprozess entfällt. Der LH<sub>2</sub>-Tank in Abbildung 15 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 16 verdeutlicht dies anhand einer Planungsgrundlage für eine Anlage zur täglichen Versorgung von rund 200 bis 250 Bussen.

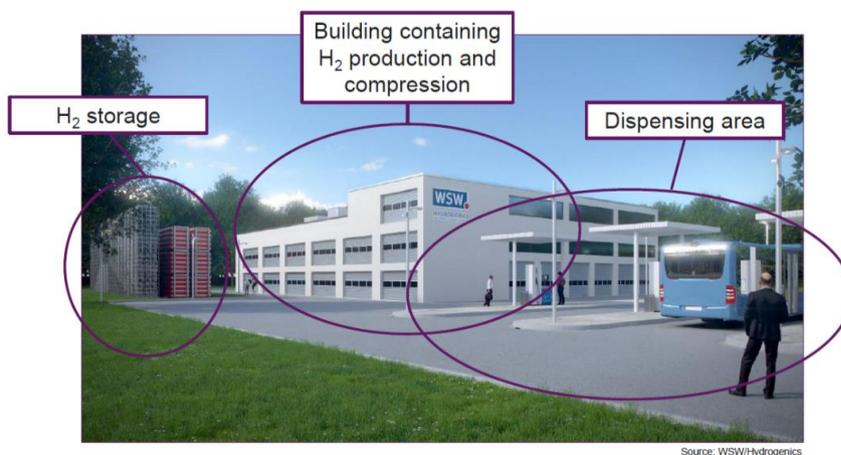


Abbildung 16: Wasserstofftankstelle mit Vor-Ort-Erzeugung mittels Elektrolyse für 200 bis 250 Busse [9]

### 1.9 Minibus als Kleinbus im Linienverkehr

Minibusse stellen einen Sonderfall dar, da sie in der Regel mit dem Fahrwerk eines Kleintransporters ausgestattet sind (siehe Abbildung 17). Sie eignen sich insbesondere für den Einkaufs- und Freizeitverkehr in ländlichen Regionen.

Aufgrund ihres Gewichtsvorteils gegenüber anderen Bauformen von Bussen kann der Betrieb eines elektrifizierten Fahrzeugs bereits unter geringem Infrastrukturaufwand erfolgen. Die Ladegeräte werden meist im Fahrzeug installiert („onboard“) und die Stromversorgung der Batterien erfolgt über einen gewöhnlichen Typ-2 Stecker (400-Volt-Anschluss) mit einer Leistung von 22 kW oder 44 kW. Elektrisch betriebene Minibusse sind am europäischen Markt aktuell ausschließlich als Batteriebusse verfügbar und werden z. B. von *VDL*, *German E-Cars* und *EMOSS* produziert. Die Batterien weisen in Abhängigkeit des Herstellers und des Fahrzeugmodells eine Kapazität zwischen 40 und 100 kWh auf, so dass sich eine Reichweite bis zu 300 km erzielen lässt.



Abbildung 17: Beispiel eines Batterie-Minibusses (Hersteller: German E-Cars, Fahrzeugname: PLANTOS) [10]

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

Die Elektrifizierbarkeit eines Busnetzes wird maßgeblich durch lokale Spezifika beeinflusst. Bspw. variieren in Abhängigkeit vom Betriebsmodell und der Liniencharakteristik die zu erbringenden Fahrleistungen. Zudem sind nicht alle Orte für die Errichtung von Lade- oder Tankinfrastruktur geeignet. Die im Rahmen der Studie erarbeitete Datengrundlage bildet die lokalen Spezifika im Stadtgebiet St. Ingbert sowie der INGO-Linien ab und dient als Basis für die weitere Betrachtung.

### 2.1 Betriebsdaten INGO-Linien

Eine wesentliche Vorgabe für die Studie war, dass Elektrobusse die gleichen Linienfahrten absolvieren müssen, wie die aktuell eingesetzten konventionellen Dieselsebuse. Das aktuelle Fahrplanangebot der INGO-Linien diene daher als Grundlage für die Studie. Diese umfasst insgesamt sechs Linien (Linie 521 bis 526), deren Fahrleistung zurzeit sieben Dieselsebuse erbringen.

Eine Besonderheit des Stadtbussystems ist das Rendezvous-Prinzip. Zu jeder halben Stunde (Linie 525 und 526 zu jeder vollen Stunde) halten alle Fahrzeuge der INGO-Linien zeitgleich am *Rendezvous-Platz* (vgl. Kapitel 2.4) im Zentrum St. Ingberts. Hierbei wechseln die Fahrzeuge in einem rollierenden Prinzip zwischen Linienfahrt und halbstündiger Pause. Dabei bleiben konstant sechs Fahrzeuge auf der Strecke und der siebte Bus pausiert am *Rendezvous-Platz*.

Linie	Strecke	Takt
521	St. Ingbert - Rohrbach Nord - St. Ingbert	halbstündlich
522	St. Ingbert - Rohrbach Süd - St. Ingbert	halbstündlich
523	St. Ingbert Zentrum - das blau Kreisel - Zentrum - In der Laabdell - Zentrum	halbstündlich
524	St. Ingbert Zentrum - In der Laabdell - Zentrum - Rote-Flur-Str. - Zentrum	halbstündlich
525	St. Ingbert - Hassel - Oberwürzbach - St. Ingbert	stündlich
526	St. Ingbert - Oberwürzbach - Hassel - St. Ingbert	stündlich

Tabelle 4: INGO-Linien

Einen wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf der Elektrobuse haben neben dem Gewicht der Fahrzeuge vor allem die Geschwindigkeit und die Topographie der Linienfahrt. Aus diesem Grund wurde für jede Linie die genaue Liniencharakteristik nachgebildet. In Abbildung 18 ist beispielhaft der Verlauf der Linie 525 dargestellt, startend von der Haltestelle *Rendezvous-Platz*, über *Hassel* und *Oberwürzbach*, bis hin zurück zum *Rendezvous-Platz*. Abbildung 19 zeigt das zugehörige Höhenprofil dieser Linie. Anhand dieser Charakteristika erfolgte in AP 2 die Energiebedarfsbestimmung für jede Linie.

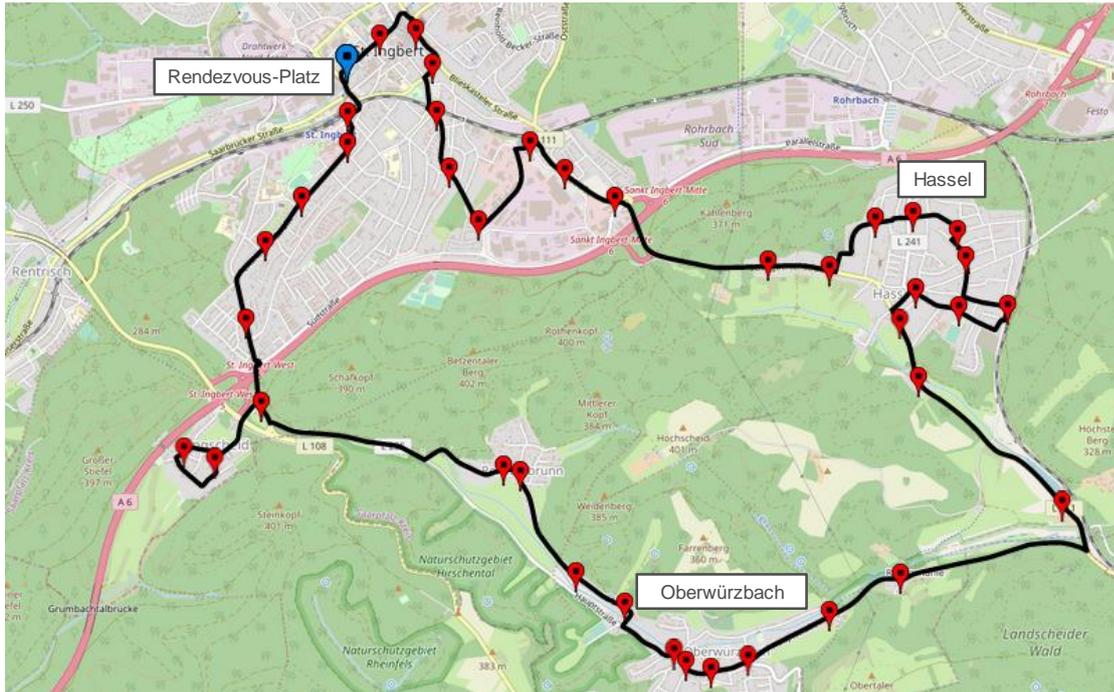


Abbildung 18: Linienvverlauf der Linie 525

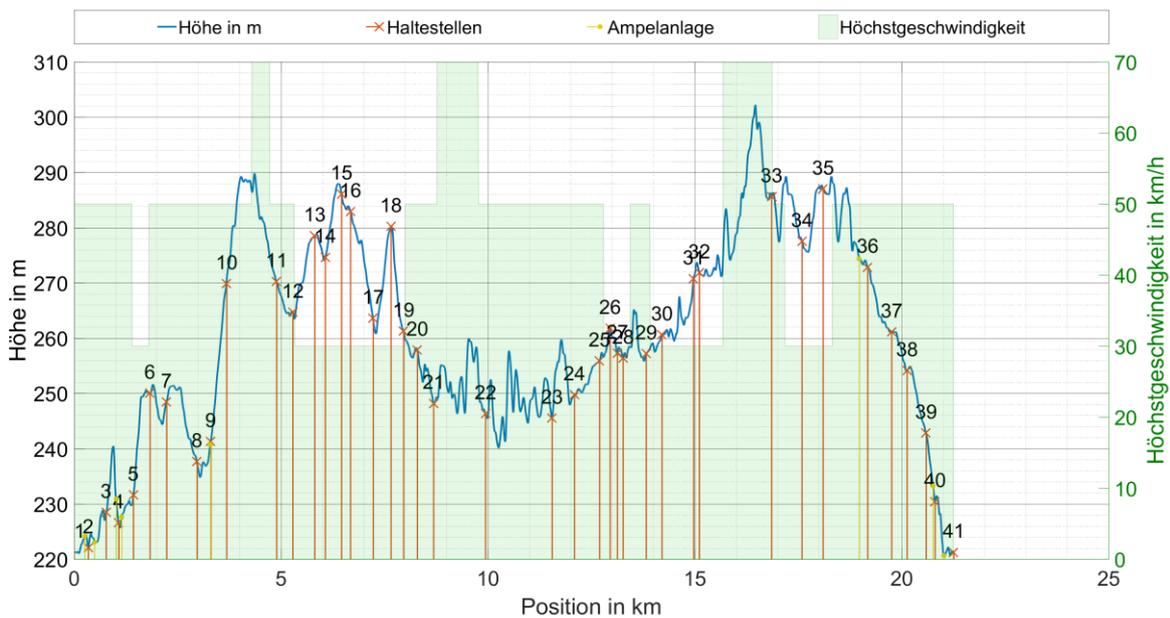


Abbildung 19: Höhenprofil der Linie 525

Bei der Analyse und Bewertung von Batteriebussen sind häufig Umlaufanpassungen erforderlich, da aufgrund der begrenzten Batteriekapazität die Reichweite limitiert ist. Diese Anpassungen erfordern meist zusätzliche Leerfahrten zwischen Endstellen oder zwischen Endstellen und der Abstellhalle. Zusätzliche Leerfahrten wurden anhand eines Routings (Berechnung der Fahrzeit und Distanzen zwischen jeder Haltestelle und der Abstellhalle) unter Berücksichtigung der konkreten Verkehrssituation erstellt und in die Datenbasis aufgenommen.

## 2.2 Grundlagen und technische Annahmen für die Studie

Die Studie umfasst die Analyse der gängigen Elektrobussysteme, welche einen lokal nahezu emissionsfreien Betrieb ermöglichen<sup>1</sup>. Es werden Batteriebusse, sowohl mit Standard- als auch mit Schnellladung, sowie Brennstoffzellenhybridbusse und Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender betrachtet. Die technischen Parameter sind nachfolgend erläutert.

### 2.2.1 Fahrzeugtechnologien und -konfigurationen

Die Mehrheit der Elektrobushersteller verfolgt einen modularen Ansatz, bei dem die Fahrzeuge in unterschiedlichen Ausprägungen konfiguriert werden können. Dies umfasst variierende Batteriegrößen, aber auch verschiedene Ladeleistungen und Koppelsysteme. Anhand der am Markt verfügbaren Fahrzeuge wurden Referenzbustypen hergeleitet.

Die Definition von Referenzfahrzeugtypen dient insbesondere dem Zweck, dass in der späteren Prüfung der technischen Machbarkeit (AP 2) sowie der Kosten- und Emissionsrechnung (AP 3) die Technologieempfehlungen nicht spezifisch für einen Hersteller getroffen werden (herstellerunabhängige Empfehlung). Die wesentlichen technischen Parameter der Referenzfahrzeugtypen sind in Tabelle 5 für die Batteriebusse (Batteriebusstypen inkl. der untersuchten Nachladeleistung) und in Tabelle 6 für die Brennstoffzellenfahrzeuge aufgeführt.

Parameter	Batteriebus 1	Batteriebus 2	Batteriebus 3
Batteriekapazität (installiert) [kWh]	180	250	350
Batteriekapazität (nutzbar) [kWh]	108	180	252
Standardladung [150 kW]	Nicht untersucht	Untersucht	Untersucht
Schnellladung [300 kW]	Untersucht	Untersucht	Untersucht
Schnellladung [450 kW]	Untersucht	Untersucht	Untersucht

Tabelle 5: Technische Parameter Batteriebusse

Parameter	Brennstoffzellenhybridbus	Batteriebus mit Brennstoffzellen-Range-Extender
	BZ-Hybrid	BZ-RE
Batteriekapazität (installiert) [kWh]	30	240
H <sub>2</sub> – Tankkapazität [kg]	35	20
Nennleistung Brennstoffzelle [kW]	100	30

Tabelle 6: Technische Parameter Brennstoffzellenbusse

---

<sup>1</sup> Einige Elektrobusse 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 die Aufwirbelung von Straßenstaub weiterhin vorhanden sind.

### 2.2.1.1 Batteriebusse

Bei Batteriebussen hängen die technische Machbarkeit und die betrieblichen Mehraufwendungen von zwei wesentlichen Faktoren ab. Der erste Parameter ist die installierte Batteriekapazität. Dieser beeinflusst direkt die Reichweite des Fahrzeugs und somit die betriebliche Auslegung. Basierend auf den aktuell am Markt erhältlichen Systemen wurden insgesamt drei unterschiedliche Batteriegrößen innerhalb der Studie untersucht. In Abbildung 20 sind die ausgewählten Werte in Relationen zu den aktuell angebotenen Batteriekapazitäten verschiedener Hersteller dargestellt.

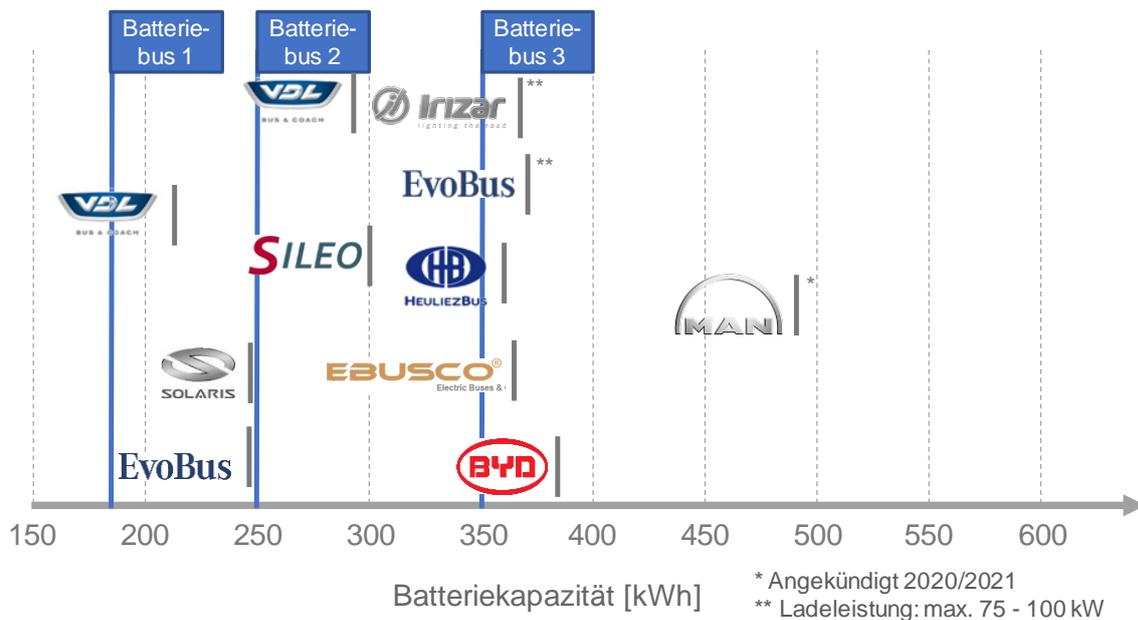


Abbildung 20: Batteriekapazitäten der Referenzbusse im Vergleich zum am Markt erhältlichen Solobussen

Die angegebenen Werte beziehen sich auf die installierte Batteriekapazität. Die tatsächlich nutzbare Kapazität wird von mehreren Faktoren beeinflusst (siehe Kapitel 1.2). 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 Prozent definiert<sup>2</sup>. Weiterhin sind die Randbereiche des Ladezustands nur begrenzt nutzbar. (Angenommen werden hier null bis fünf Prozent und 80 bis 100 Prozent für Batteriebus 1 und null bis fünf Prozent sowie 95 bis 100 Prozent für die Batteriebusse 2 und 3). Daraus ergibt sich eine über die gesamte Lebensdauer nutzbare Entladetiefe von 60 Prozent bzw. 72 Prozent. Konkret bedeutet dies, dass bei einer installierten Batteriekapazität von 250 kWh für den Fahrbetrieb effektiv nur 180 kWh nutzbar sind.

Neben der Batteriekapazität ist die Ladeleistung entscheidend für die technische Machbarkeit der Batteriebusse. Im Idealfall ist diese ausreichend, um innerhalb der in den Umlaufplänen

<sup>2</sup> Das sogenannte „End-of-Life“ (EOL) liegt bei einer Kapazität von 80 %, bezogen auf die anfängliche Kapazität einer neuen Batterie.

vorhandenen Standzeit (entweder an der Abstellhalle oder am *Rendezvous-Platz*) den Energiebedarf des vorherigen Abschnitts nachladen zu können. Somit wäre ein „ladungserhaltender“ Betrieb zu gewährleisten.

Für die betrachteten Referenzbustypen wurden drei unterschiedliche Ladeleistungen definiert, welche sich an Systemen orientieren, die am Markt verfügbar sind. Sogenannte Standardladung wird durch eine maximale Ladeleistung von 150 kW definiert. Dieser Wert orientiert sich an den maximalen Ladeleistung der CCS-Steckerverbindung, die ebenfalls im Automobilsektor Anwendung findet.

Neben der Standardladung wurde die Möglichkeit der Schnellladung untersucht, die durch hohe Ladeleistungen ab 300 kW definiert ist. In der Studie wurde zum einen die Umsetzung mit einer Ladeleistung von 300 kW untersucht, was zum Beispiel dem Elektrobussystem in Köln entspricht. Zum anderen wurde die Variante mit einer Ladeleistung von 450 kW analysiert, die bspw. in Hannover realisiert ist.

Die Fahrzeugkonzepte definieren sich über die Kombinationen aus den Batteriekapazitäten und den Ladeleistungen. Ein Konzept mit Batteriebus 1 und Standardladung wird dabei jedoch nicht untersucht. Durch die geringe Batteriekapazität (und somit eine geringe Reichweite) sowie die begrenzte Ladeleistung werden viele und entsprechend lange untertägige Ladefenster notwendig. Ein solches System führt zu stark reduzierten Einsatzflexibilitäten und ist für eine Elektrifizierung der INGO-Linien nicht sinnvoll.

### 2.2.1.2 Brennstoffzellenhybridbusse

Die technischen Parameter des Referenzfahrzeugs des Brennstoffzellenhybridbusses in der Studie wurden für die Batteriekapazität zu 30 kWh, für das Fassungsvermögen der Wasserstofftanks zu 35 kg und für die Nennleistung der Brennstoffzelle zu 100 kW definiert. Die hier jeweils angenommenen Parameterwerte sind aufgrund des aktuell verfügbaren Marktangebots und angekündigter Busmodelle gewählt.

### 2.2.1.3 Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender

Für die Studie wurde das Konzept für Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender mit einer Batteriekapazität von 240 kWh definiert. Die Wasserstofftankkapazität ist zu 20 kg angenommen und die Nennleistung der Brennstoffzellensysteme entspricht 30 kW. BZ-RE werden aktuell nicht serienreif bzw. seriennah am Elektrobussmarkt angeboten, wodurch die Verfügbarkeit dieser Technologie stark eingeschränkt ist. Die gewählten Werte orientieren sich an Konzept- und Prototypenfahrzeugen.

## 2.2.2 Nebenverbraucher und Klimatisierungskonzepte

Der Energiebedarf von Elektrobussen setzt sich aus zwei Kategorien zusammen. Ein wichtiger Bestandteil ist dabei der Energiebedarf des Traktionssystems, also die benötigte Energie für den elektrischen Antrieb. Dieser hängt dabei insbesondere von Routen- und Fahrtcharakteristik der Linien ab, bspw. von der Topographie oder dem Beschleunigungsverhalten.

Ein weiterer wesentlicher Faktor ist der Energiebedarf für die Nebenaggregate der Fahrzeuge. Hierunter zählen neben dem Druckluftkompressor, der Lenkunterstützung sowie den Informations- und Beleuchtungssystemen vor allem das Heizungs-, Lüftungs- und Klimatisierungssystem (HLK). In Elektrobussen fällt, im Gegensatz zu den konventionellen Dieseln, kaum nutzbare Abwärme an, weshalb separate Heizsysteme verwendet werden müssen. Im Gegensatz zum Traktionsbedarf ist der Energiebedarf für die Nebenverbraucher zeit- und temperaturabhängig. Die Nebenverbraucher konsumieren sowohl während der Fahrt als auch während der Pausen oder im Stillstand an Haltestellen kontinuierlich Energie.

Eine Vorgabe für diese Studie ist, dass Elektrobuse die gleichen Komfortmerkmale aufweisen, wie die aktuell betriebenen Dieseln. Im Sommer ist daher eine Vollklimatisierung der Fahrzeuge 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 fossilem Zusatzheizer

Bei milden Temperaturen (ca. +4 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 fossiler Zusatzheizer, der in der Regel mit Diesel betrieben wird. Lösungen mit Bio-Ethanol sind technisch möglich, jedoch aktuell kaum verbreitet. Bei einem vollelektrischen Heizsystem (ElHe) wird hingegen ein elektrisches PTC-Heizelement (Positive Temperature Coefficient) eingesetzt. Hierdurch wird ein lokal emissionsfreier Betrieb ermöglicht, jedoch führt der hohe Bedarf an elektrischer Energie 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 21 zeigt eine schematische Darstellung und kennzeichnet die Worst-Case-Szenarien der elektrischen Leistung.

Für die Konzepte mit vollelektrischer Zusatzheizung ist der Worst-Case der Winterbetrieb mit aktivem elektrischem Zusatzheizer. Für die Hybridheizung ist es umgekehrt, da ein fossiler Zusatzheizer verwendet wird. Hier ist der Sommerbetrieb für die maximale elektrische Nebenverbraucherleistung maßgebend. Im Rahmen der Studie wurden sowohl die vollelektrische Heizung als auch die Hybridheizung analysiert.

- **A** Vollelektrische Heizung mit Wärmepumpe und Klimatisierung
- **B** Hybridheizung (elektrisch / fossil) mit Wärmepumpe und Klimatisierung
- **C** Brennstoffzellenbus mit vollelektrischer Heizung

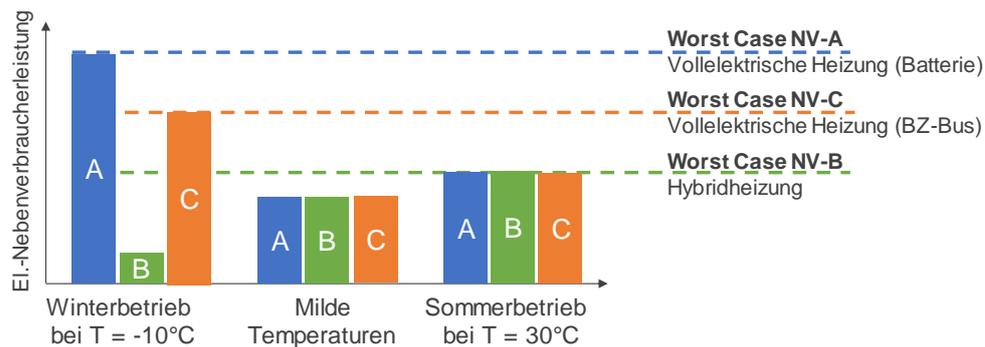


Abbildung 21: Schematische Darstellung der relevanten Worst-Case-Szenarien unterschiedlicher Nebenverbraucherkonfigurationen

### 2.2.3 Ladeinfrastruktur für Batteriebusse

In jedem Elektrifizierungsvorhaben spielt neben der Fahrzeugtechnik auch das Thema Infrastruktur eine wesentliche Rolle. Die drei zentralen Elemente für die Errichtung der Ladeinfrastruktur für Batteriebusse sind dabei der Netzanschluss, die Ladegeräte sowie die Kopplungstechnik zum Fahrzeug.

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 Abstellhallen müssen daher in den meisten Fällen neue Netzanschlüsse an das Mittelspannungsnetz und eine nachgelagerte Umspannung auf Niederspannung realisiert werden. Der Netzübergabepunkt wird in der Studie für den Anschluss an die Mittelspannung definiert.

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 Standardladung werden Ladegeräte mit bis zu 150 kW Ausgangsleistung eingesetzt, für die Schnellladung sind aktuell bis zu 450 kW realisiert. Die betrachteten Ladegeräteoptionen in der Studie orientieren sich an diesen Werten und der Leistungsfähigkeit der definierten Referenzfahrzeuge.

Abhängig von der Ladeleistung variiert die Größe der Ladegeräte. Abbildung 22 zeigt ein Beispiel der Firma *Heliox* für die Leistungsklassen 150 kW und 300 kW. Das Schnellladegerät besteht aus mehreren Schaltschränken mit einer Höhe von 2,30 m und einer insgesamt Breite von 4,80 m. Die Errichtung solcher Ladegeräte stellt erhebliche Anforderungen an die verfügbaren Flächen in der Abstellung und am *Rendezvous-Platz*.



Abbildung 22: Ladegeräte der Firma Heliox mit einer Ausgangsleistung von 150 kW und 300 kW

Die Energiezufuhr zum Fahrzeug erfolgt über die Kopplungstechnik. Wie in Kapitel 1.5.2 beschrieben, haben sich in der Vergangenheit konduktive Systeme am Markt durchgesetzt. Abhängig von der zu übertragenden Leistungen variiert die Eignung der unterschiedlichen Optionen. Eine Ladung mittels Stecker ohne Kühlung ist bspw. auf einen Strom von 200 A und damit auf eine Ladeleistung von maximal 150 kW begrenzt. Mit Pantographen sind höhere Ladeleistungen möglich. Für die Studie wird festgelegt, dass die Konzepte mit Standardladung mittels CCS Combo 2 Stecker (siehe Abbildung 8) und die Konzepte mit Schnellladung mittels Pantographen (siehe Abbildung 9) nachgeladen werden.

### 2.2.4 Wasserstoffbezug

Für die Studie wird angenommen, dass Brennstoffzellenfahrzeuge den Wasserstoff an einer externen Tankstelle beziehen. Konzepte mit Vor-Ort-Elektrolyseur sind in erster Linie für Großflotten geplant, weshalb ein solcher nicht für die Stadt St. Ingbert zu empfehlen ist. Der Einsatz einer eigenen Tankstelle ist ebenfalls nicht sinnvoll, da diese einen erhöhten Platzbedarf erfordert. Darüber hinaus müssen Kompetenzen für den Betrieb aufgebaut werden, was ebenfalls erst lohnenswert ist, wenn eine größere Flotte elektrifiziert wird.

## 2.3 Busabstellung

Eine Elektrifizierung des Busverkehrs hat direkte Konsequenzen auf die Busabstellung. Zur Versorgung der Elektrobusse muss Infrastruktur installiert werden, die sowohl in Bezug auf den Platzbedarf als auch in Bezug auf den Netzanschluss neue Herausforderungen mit sich

bringt. Weiterhin muss beachtet werden, dass sowohl bei Technologielösungen mittels reinen Batteriebusen als auch für Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender Ladeinfrastruktur an der Busabstellung installiert werden muss.

Weiterer Anpassungsbedarf ergibt sich für die Fahrzeughandhabung, die Betriebsabläufe sowie die Werkstatt. Aufgrund eines potentiellen Fahrzeugmehrbedarfs gilt es weiterhin zu prüfen, in welchem Umfang zusätzliche Stellfläche für die Abstellung von Fahrzeugen verfügbar ist.

Zurzeit werden die Fahrzeuge, die für auf den INGO-Linienbetrieb eingesetzt werden, in der Abstellhalle in der *Sophie-Krämer-Straße* über Nacht untergebracht. Insgesamt können dort 16 Fahrzeuge abgestellt werden, wobei neben den Fahrzeugen der INGO-Linien weitere Busse von *Saar-Mobil* abgestellt sind.

Die Installation der Ladeinfrastruktur erfolgt sinnvollerweise in der Nähe der Fahrzeuge, um Leitungsverluste zu begrenzen. Die dichte Abstellung der Fahrzeuge lässt hierbei jedoch nur wenig Raum, so dass grundlegende bauliche Maßnahmen für die Errichtung von Ladeinfrastruktur erforderlich sind.



Abbildung 23: Abstellhalle Sophie-Krämer-Str. (Frontsicht)



Abbildung 24: Abstellhalle Sophie-Krämer-Str. (Draufsicht)

Ein möglicher Installationsort der Ladegeräte inkl. des notwendigen Netzanschlusses (Schaltanlagen, Transformator, Netztechnik, etc.) könnte hierbei oberhalb der Abstellhalle sein (rote Fläche in Abbildung 24). Von dieser Fläche würden die Ladekabel in die Betriebshalle und entlang der Hallendecke an die jeweiligen Abstellplätze geführt. Als Kopplungs- bzw. Kontaktierungstechnik zu den Fahrzeugen können entweder CCS-Ladestecker oder Ladehauben, gemäß Abbildung 8 und Abbildung 9, eingesetzt werden.

## 2.4 Potenzielle Ladeorte für Batteriebusse

Der Betrieb von Batteriebussen erfordert ein regelmäßiges Nachladen der Fahrzeuge. Ladeinfrastruktur muss daher – sowohl bei Batteriebussen mit Standardladung, als auch bei Lösungen mittels Schnellladung – an der Abstellhalle installiert werden. Weitere Ladestationen für die Schnellladung werden idealerweise an den Endstellen der Linien errichtet. Ladestationen an Haltestellen auf der Strecke sind aufgrund der sehr geringen Standzeit eher ungeeignet.

Durch das Rendezvous-Prinzip ist insbesondere der *Rendezvous-Platz* ein aussichtreicher Kandidat für die Errichtung von Ladeinfrastruktur. Die Tatsache, dass die Fahrzeuge halbstündlich und zeitgleich an der Endstelle halten, vereinfacht den Linien- und Fahrzeugwechsel, wodurch Synergieeffekte entstehen können. Im Rahmen des Arbeitspakets wurde die Endstelle anhand betrieblicher, baulicher und technischer Kriterien bewertet.



Abbildung 25: Rendezvous-Platz

Hierbei wurden zwei Optionen für die Ausgestaltung der Ladeinfrastruktur erarbeitet; zum einen die Ladung mittels CCS-Stecker und geringer Ladeleistung, zum anderen die Nachladung über einen Lademast mit hohen Ladeleistungen.

Die Bewertung hinsichtlich des Platzbedarfs erfolgt auf Grundlage von Luftbildern und Vor-Ort-Aufnahmen. Ein weiteres Kriterium zur Bewertung des *Rendezvous-Platzes* ist die Abstellungssituation der Fahrzeuge. Hierbei wurde analysiert, ob zusätzlich zur Errichtung von Ladeinfrastruktur auch eine Überlage realisiert werden kann. Eine Überlage beschreibt dabei den Einsatz eines weiteren Fahrzeugs zur Generierung zusätzlicher Ladezeit. Diese wird notwendig, falls die halbstündige Standzeit des siebten Fahrzeugs nicht ausreicht, um genügend Energie für den weiteren Betrieb in das Fahrzeug zu laden.

Als möglicher Ort zur Aufstellung der Ladeinfrastruktur wurde die Fläche an der Rückwand der Postbankfiliale identifiziert. In Abbildung 26 und Abbildung 27 sind hierfür ein Lageplan sowie ein mögliches Aufstellungskonzept zur Errichtung der Ladeinfrastruktur am *Rendezvous-Platz* skizziert. Um Kabelwege und somit Leitungsverluste möglichst gering zu halten, ist es sinnvoll, die Netzstation sowie die Ladegeräte möglichst nah an der Abstellung der Fahrzeuge zu errichten. Die Busse würden dort rückwärts abgestellt und über Stecker oder Pantograph nachgeladen.

Aktuell befinden sich an dieser Stelle zwei PKW-Parkplätze, ein Fahrradabstellplatz sowie zwei PKW-Ladestationen inkl. Stellplätzen. Zur Installation der Ladeinfrastruktur für Elektrobusse müssen diese entsprechend an eine andere Stelle versetzt werden. Aufgrund der Platzsituation können an der betrachteten Stelle maximal zwei Fahrzeuge gleichzeitig abgestellt und geladen werden. Dies hat zur Folge, dass Fahrzeugkonzepte, die zur Erbringung der INGO-Fahrleistung mehr als acht Busse benötigen, technisch nicht sinnvoll umsetzbar sind.

Ein weiterer Aspekt, der bei einer Aufstellung an dieser Stelle beachtet werden muss, ist, dass der Weg zwischen dem Rathaus und der Rückwand der Postbankfiliale als Durchgang von Fußgängern genutzt wird. Hierbei werden ggf. weitere bauliche Maßnahmen notwendig (bspw. eine Versetzung der Grünflächen), um Fußgängern einen alternativen Gehweg zu ermöglichen.



Abbildung 26: möglicher Lageplan der Ladeinfrastruktur am Rendezvous-Platz

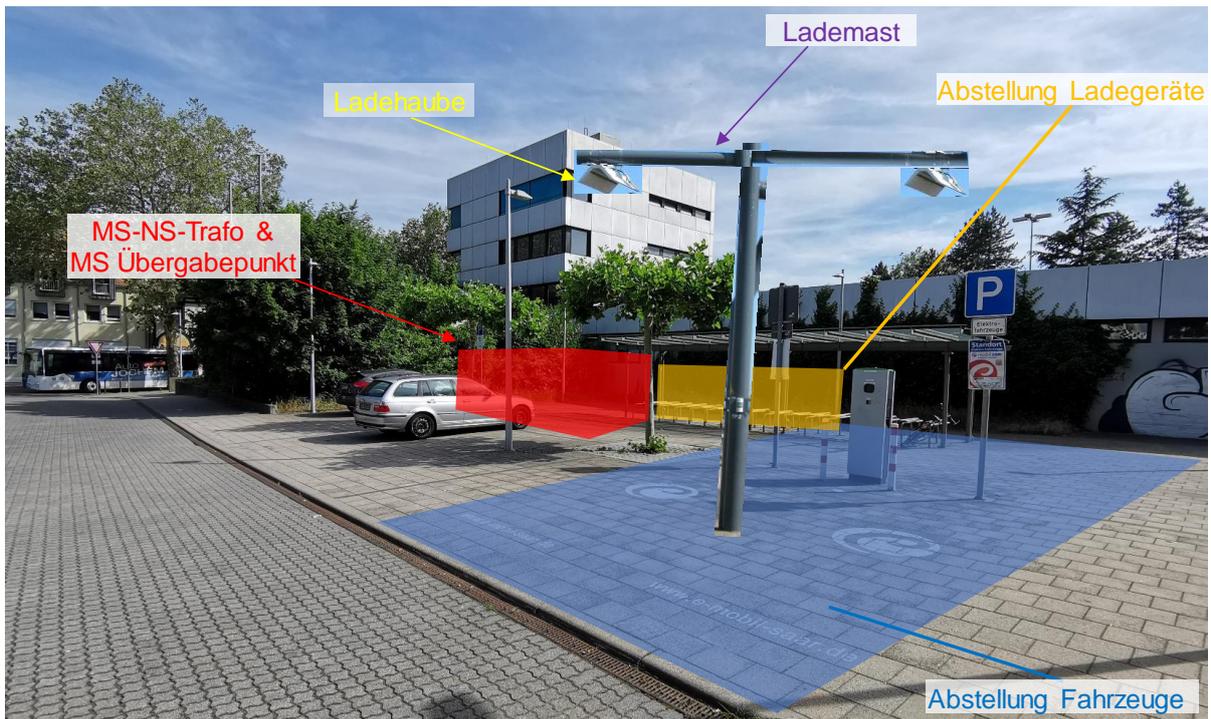


Abbildung 27: Aufstellungskonzept Rendezvous-Platz mit Schnellladung und Lademast

## 2.5 Gewerbebuslinien

Die Stadt St. Ingbert beabsichtigt, ein "betriebliches Mobilitätsmanagement" für verschiedene Gewerbegebiete zu entwickeln, um die Standortbedingungen für die ansässigen Unternehmen zu verbessern und den Beschäftigten die Anreise zu den Betrieben mittels ÖPNV zu ermöglichen. Im Zuge dessen wurde im Jahr 2016 eine Machbarkeitsstudie für die Erschließung des Gewerbegebiets Süd durchgeführt [11].

Zur Erschließung des Gewerbegebiets mittels ÖPNV wurde der Bedarf von drei zusätzlichen Linien identifiziert. Die Charakteristika der Planungslinien sind in Tabelle 7 aufgeführt. Für den Betrieb der Gewerbebuslinien mit Dieselnissen wären drei Fahrzeuge notwendig. Die Fahrzeuge, die auf den Planungslinien A und B, eingesetzt werden, haben jeweils zwei Linienfahrten morgens (5.20-6.40 Uhr), mittags (ca. 13.20-14.40 Uhr) und abends (21.20-22.40 Uhr). Die Planungslinie C fährt regelmäßiger und nur im Zeitraum zwischen 9.00-12.00 Uhr findet kein Linienbetrieb statt. Der Linienbetrieb umfasst ca. 250 Tage im Jahr. Auf Basis der Ergebnisse der INGO-Linien erfolgt in AP 4 eine Diskussion der Elektrifizierungsmöglichkeiten der Gewerbebuslinien.

Linie	Strecke	Distanz pro Fahrt	Fahrten am Tag	Dauer pro Fahrt
Planungslinie A	Spiesen - Elversberg - Rohrbach - St. Ingbert	19,5 km	6	37 min
Planungslinie B	Rischbach - Mühlwald - Rohrbach	15,1 km	6	28 min
Planungslinie C	Rendezvous-Platz - IGB Bf - Schiffelland - Festo	7,7 km	13	16 min

Tabelle 7: Gewerbebuslinien

## 2.6 Clean Vehicle Directive

Die Elektrifizierung der Nahverkehrsbusflotten genießt auf europäischer Ebene hohe Priorität und wurde mit der „*Clean Vehicle Directive*“ für alle Mitgliedstaaten verpflichtend [12]. Sie beschreibt eine Richtlinie der Europäischen Union zur Förderung sauberer und energieeffizienter Fahrzeuge. Sie ist ab Mitte 2019 gültig und muss bis spätestens Juli 2021 in nationales Recht umgesetzt werden. Nach dieser Richtlinie gelten für öffentliche Behörden und Unternehmen verbindliche Beschaffungsquoten für „saubere“ und „emissionsfreie“ Nutzfahrzeuge.

Ein „sauberes Fahrzeug“ ist definiert als ein Nutzfahrzeug, das mit „alternativen Kraftstoffen“ betrieben wird. Unter „alternative Kraftstoffe“ fallen neben Elektrizität und Wasserstoff ebenfalls Bio-Kraftstoffe, synthetische und paraffinhaltige Kraftstoffe sowie Erd- und Flüssiggas.

Weiterhin gilt, dass von den beschafften „sauberen Bussen“ mindestens die Hälfte „emissionsfrei“ sein muss. Dabei definiert die EU ein Fahrzeug als „emissionsfrei“, wenn von diesem weniger als 1 g CO<sub>2</sub>/kWh im Fahrbetrieb ausgestoßen wird. Darunter fallen insbesondere Batterie- und Brennstoffzellenbusse.

Die verbindlichen Beschaffungsquoten für Busse sind dabei wie folgt definiert:

- Juli 2021 bis Dezember 2025: Quote von 45 Prozent für „saubere Bussen“
- Januar 2026 bis Dezember 2030: Quote von 65 Prozent für „saubere Bussen“

Es ist dabei zu beachten, dass die Quoten sowohl für Verkehrsunternehmen gelten (im Zuge der Beschaffung und des Kaufs von Bussen) als auch für Aufgabenträger (bei der Vergabe von Fahrleistungen). Sie sind für die Gesamtzahl der in dem jeweiligen Zeitraum unter den Anwendungsbereich fallenden beschafften Fahrzeuge und Fahrleistungen gültig.

Die Richtlinie wurde bisher nur auf europäischer Ebene definiert, und die exakte Umsetzung in nationales Recht wird zurzeit noch erarbeitet. Die dargestellten Quoten gelten für alle Beschaffungen und Ausschreibungen, die in diesen Zeiträumen in Deutschland umgesetzt werden. Im Zuge dessen hat der Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) angeregt, dass die Quoten nur auf Bundesebene und nicht für jedes Verkehrsunternehmen oder jeden Aufgabenträger gelten sollen. Dies hätte zur Folge, dass zukünftige Großbetreiber elektrischer Flotten, wie die *Hamburger Hochbahn* oder die *Berliner Verkehrsbetriebe*, kleinere Städte bzw. Verkehrsunternehmen ausgleichen.

Aufgrund dieser Überlegung sind die Auswirkungen der Richtlinie auf die Stadt St. Ingbert zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht final absehbar. Sie lassen sich erst präzisieren, wenn die Richtlinie in nationales Recht umgesetzt worden ist.

### 3. Technische und betriebliche Analyse (AP 2)

Die technische und betriebliche Analyse der Elektrobusskonzepte erfolgte für die gesamte Fahrleistung des Stadtbussystems. Zielsetzung war dabei, die technischen Grundlagen (Energieverbräuche, minimale Batteriegrößen, benötigte Ladestationen) und die betrieblichen Konsequenzen (Anzahl der benötigten Fahrzeuge, zusätzliche Leerkilometer und Fahrzeit) zu ermitteln, die anschließend als Eingangsdaten für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dienen.

Im Gegensatz zu Dieselbussen gibt es bei Elektrobussen wesentliche Rahmenbedingungen, welche die technische Machbarkeit einer Elektrifizierung und den Betrieb erheblich beeinflussen. Durch geringere Reichweiten sind Dieselbusumläufe mit hohen Fahrleistungen nicht ohne Anpassungen darstellbar. Es müssen in die Umlaufplanung Ladefenster an der Abstellhalle bzw. am *Rendezvous-Platz* eingeplant werden, so dass für die Fortsetzung des Linienbetriebs wieder genügend Energie in die Fahrzeuge nachgeladen werden kann. 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 pro Bus notwendig werden. Die genannten Rahmenbedingungen wurden in der Studie für die gesamte Fahrleistung detailliert untersucht. Die dabei verwendete Methodik und die Kriterien sind nachfolgend erläutert.

#### 3.1 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 (z.B. den Worst-Case-Energiebedarf der Nebenverbraucher), zum anderen auf den technischen Zustand der Fahrzeuge, wie bspw. den Kapazitätsverlust der Batterie durch Alterung. Daher wurde die jeweils ungünstigste Kombination bestehend aus maximalem Energiebedarf der Nebenverbraucher und gealterter Batterie am Ende der Lebensdauer (80 Prozent Restkapazität) angenommen.

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 in der Abstellhalle bzw. am *Rendezvous-Platz* in den Betriebsablauf integriert werden. Abhängig von der Liniencharakteristik ergeben sich hieraus ein Fahrzeugmehrbedarf, zusätzliche Fahrzeit und zusätzliche Leerkilometer, welche im Rahmen der Analyse erfasst und in der späteren Kostenrechnung berücksichtigt werden.

Die Definition von unterschiedlichen Fahrzeugtypen, Nebenverbraucher-Konfigurationen und Szenarien führt zu einem sehr umfassenden Ergebnisraum. Für die gesamte Fahrleistung der

INGO-Linien wurden alle Permutationen analysiert und bewertet. Abbildung 28 veranschaulicht den Zusammenhang der Ergebnisse.

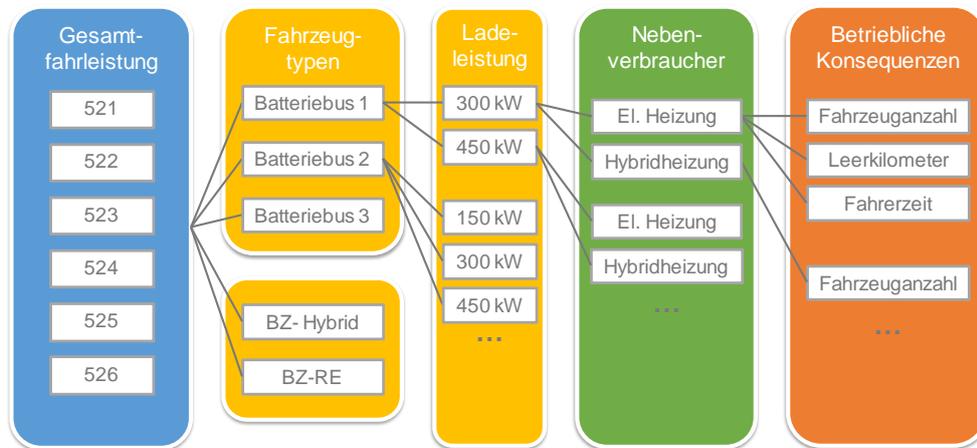


Abbildung 28: Zusammenhang der Ergebnisse für alle Linien mit den unterschiedlichen Szenarien, Fahrzeugtypen und Nebenverbraucherkonfigurationen

### 3.2 Detailergebnisse Standardladung

In der folgenden Diskussion werden die unterschiedlichen Elektrifizierungsoptionen sowohl für den Ladestandort in der Abstellhalle in der *Sophie-Krämer-Straße* als auch am *Rendezvous-Platz* sowie für Brennstoffzellenfahrzeuge analysiert. Grundsätzlich gilt für eine Nachladung an der Abstellhalle, dass zu jedem halbstündigen „Treffen“ der Busse am *Rendezvous-Platz* Fahrzeuge aus dem Betrieb gezogen werden. Der Betrieb der herausgezogenen Busse wird dann durch Fahrzeuge fortgesetzt, die im vorherigen Takt nachgeladen wurden. Neben betrieblichen Konsequenzen für die Umlaufplanung der Fahrzeuge werden hierdurch ebenfalls die Dienste der Fahrer bzw. die Dienstpläne beeinflusst (vgl. Kapitel 3.5).

Falls die Fahrzeuge am *Rendezvous-Platz* nachgeladen werden, werden sie direkt dort getauscht, genau wie beim aktuellen Dieselbusbetrieb. Weiterhin handelt es sich bei der folgenden Betrachtung um die untertägige Ladelösungen. Das nachbetriebliche Nachladen über Nacht erfolgt ausschließlich in der Abstellhalle.

Aktuell wird der Fahrbetrieb der INGO-Linien mit sieben Diesel-Solobussen durchgeführt. Das entsprechende Einsatzkonzept wird in Abbildung 29 dargestellt, wobei in dunkelblau die Linienfahrten und in hellblau die Leerfahrten abgebildet sind. Die Bezeichnungen „bus run 1“ bis „bus run 7“ entsprechen dabei dem täglichen Einsatzprofil eines Fahrzeugs. Die Gesamttagesfahrleistung der Busse im Liniendienst beträgt 1.808 km, wodurch jedes Fahrzeug im Schnitt täglich rund 260 km zurücklegt.

An dieser Laufleistung ist bereits zu erkennen, dass eine ausschließliche Übernachtladung (ohne untertägige Ladephase) nicht möglich ist. Die in aktuellen Ausschreibungen garantieren Reichweiten der Hersteller belaufen sich dabei auf ca. 150 bis 200 km; unter Berücksichtigung

einer gealterten Batterie sowie den anspruchsvollsten klimatischen Bedingungen. Herstellerangaben, die in einer Reichweitenregion von 250 bis 300 km liegen, beziehen sich auf energetisch günstige Bedingungen (milde Temperaturen, neue Batterie) und können der technischen Machbarkeit nicht zugrunde gelegt werden.

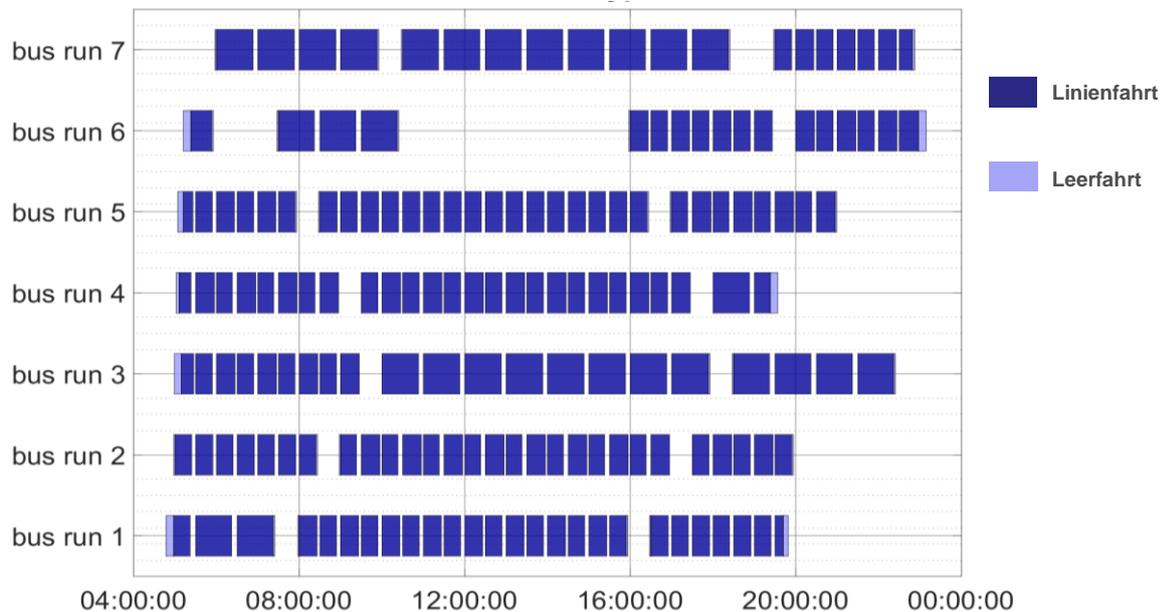


Abbildung 29: Einsatzkonzept Dieselbusse

### 3.2.1 Ergebnisse Standardladung - Abstellhalle Sophie-Krämer-Straße

Die aktuellen Dieselbusumläufe sind mit Elektrobuskonzepten mit Standardladung nicht darstellbar. Eine Elektrifizierung des Betriebs ist nur mit betrieblichen Anpassungen und dem Einsatz zusätzlicher Fahrzeuge möglich. Zunächst werden die Ergebnisse für die Standardladung an der *Sophie-Krämer-Straße* vorgestellt.

Das Betriebskonzept für den Einsatz des Batteriebus 2 (250 kWh Batteriekapazität) mit voll-elektrischer Heizung (EIHe) ist in Abbildung 30 dargestellt. Diese Lösung entspricht der Konfiguration, in der die geringste Reichweite erzielt wird, was somit das energetisch anspruchsvollste Szenario beschreibt. Neben den in dunkelblau dargestellten Linienfahrten sind in hellblau die Leerfahrten, in gelb die untertägigen Ladefenster sowie in orange die Ladefenster über Nacht gezeigt. Die Ladefenster (sowohl untertägig als auch über Nacht) zeigen nur die möglichen Zeiten, an denen das Fahrzeug geladen werden kann. Die Ladephasen (Zeiten, in denen das Fahrzeug aktiv geladen wird) können geringer sein. Um den Betrieb der INGO-Linien mittels dieses Elektrifizierungskonzepts durchzuführen, werden im Vergleich zum Betrieb mit Dieselbussen zwei zusätzliche Fahrzeuge benötigt. Alle Busse müssen dabei untertägig (teilweise mehrfach) zurück in die Abstellhalle, um dort nachzuladen. Dabei sind die Ladefenster so angeordnet, dass immer sechs Fahrzeuge im Einsatz sind, um den Liniendienst uneingeschränkt erbringen zu können.

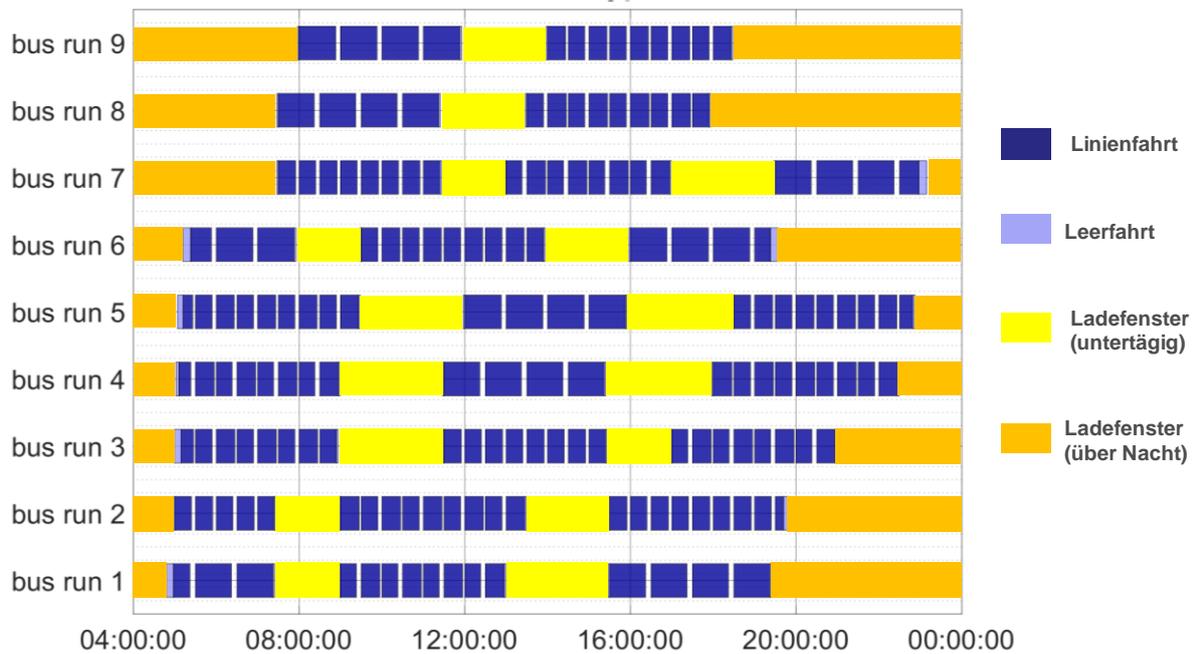


Abbildung 30: Betrieb mit Batteriebus 2, 150 kW Ladeleistung und vollelektrischer Heizung - Abstellhalle

Die Konfiguration Batteriebus 3 (größere Batteriekapazität von 350 kWh) mit Hybridheizung (HyHe) wird in Abbildung 31 aufgezeigt. Die Kombination aus größerer Batterie und dem energetisch günstigeren Fall der Hybridheizung ermöglichen eine höhere Reichweite, woraus eine Optimierung des Betriebskonzepts resultiert. Die Anzahl der notwendigen Fahrzeuge kann auf acht Busse reduziert werden. Weiterhin werden aufgrund der höheren Reichweite die Umlauf-längen der einzelnen Fahrzeuge vergrößert, so dass die Anzahl der untertägigen Ladefenster verkleinert werden kann. Während für ein Betriebskonzept mit Batteriebus 2 und voll-elektrischer Heizung 16 Ladefenster benötigt werden, sind für die Konfiguration lediglich 9 La-defenster notwendig. Dies hat die unmittelbare Konsequenz, dass Leerfahrten und -kilometer sowie Fahrzeugtausche reduziert werden können.

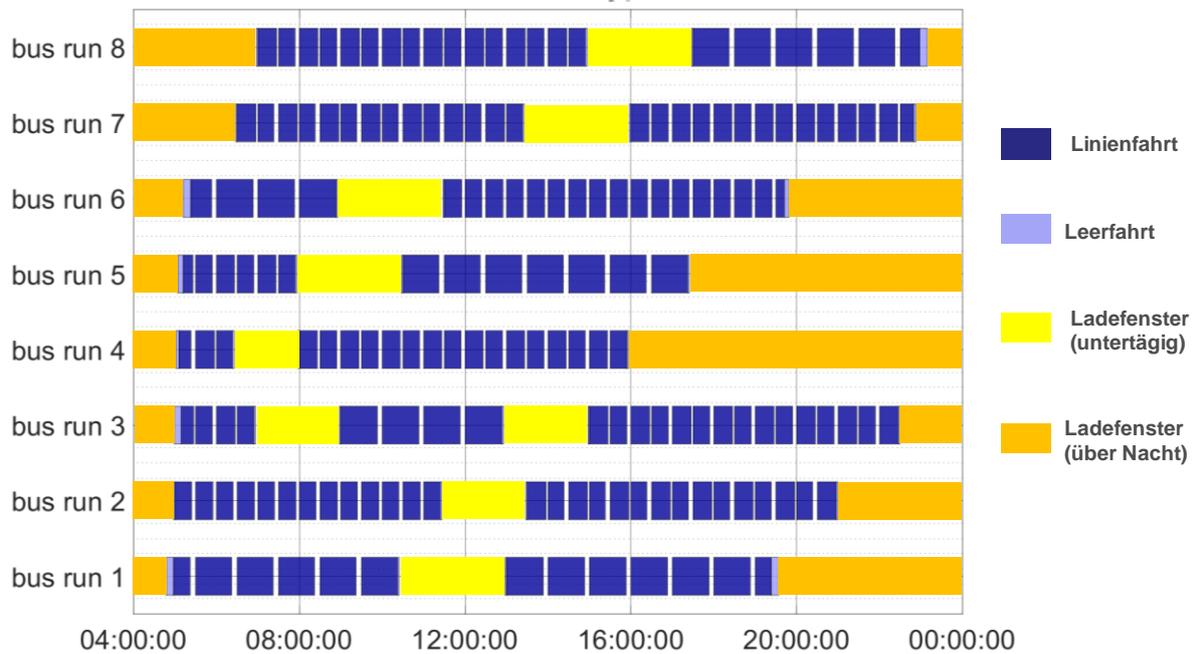


Abbildung 31: Betrieb mit Batteriebus 3, 150 kW Ladeleistung und Hybridheizung - Abstellhalle

### 3.2.2 Ergebnisse Standardladung Rendezvous-Platz

Neben der Möglichkeit der untertägigen Ladung in der Abstellhalle besteht weiterhin die Option auf Nachladung am *Rendezvous-Platz*. Analog zu Kapitel 3.2.1 wird zunächst das Konzept mit Batteriebus 2 und vollelektrischer Heizung diskutiert. Vergleichbar mit einer Nachladung an der *Sophie-Krämer-Straße* werden für dieses Konzept neun Fahrzeuge benötigt. Ein Betriebskonzept mit neun Fahrzeugen ist jedoch aufgrund der Platzsituation am *Rendezvous-Platz* (vgl. Kapitel 2.4) nicht darstellbar, wodurch diese Elektrifizierungslösung nicht bzw. nur mit erheblichem Aufwand umsetzbar ist.

In Abbildung 32 ist der Betrieb mit Batteriebus 3 und Hybridheizung dargestellt. In dieser Konfiguration werden acht Fahrzeuge für den Linienbetrieb benötigt. Da der Fahrzeugwechsel und die Nachladung unmittelbar an der Haltestelle vollzogen werden, reduzieren sich die Leerkilometer sowie die dienstlichen Aufwände für den Fahrzeugtausch. Die Anzahl der Ladefenster wird jedoch nicht verändert, im Vergleich zu einer Nachladung an der Abstellhalle.

Insgesamt lässt sich für die Elektrifizierungskonzepte mittels Standardladung festhalten, dass der mögliche Ladeort keinen Einfluss auf den Fahrzeugbedarf hat. Für Batteriebus 2 (sowohl EIHe als auch HyHe) und Batteriebus 3 (EIHe) werden sowohl für den Ladeort an der *Sophie-Krämer-Straße* als auch am *Rendezvous-Platz* neun Fahrzeuge benötigt. Für den Batteriebus 3 mit Hybridheizung müssen unabhängig vom Ladeort acht Busse eingesetzt werden.

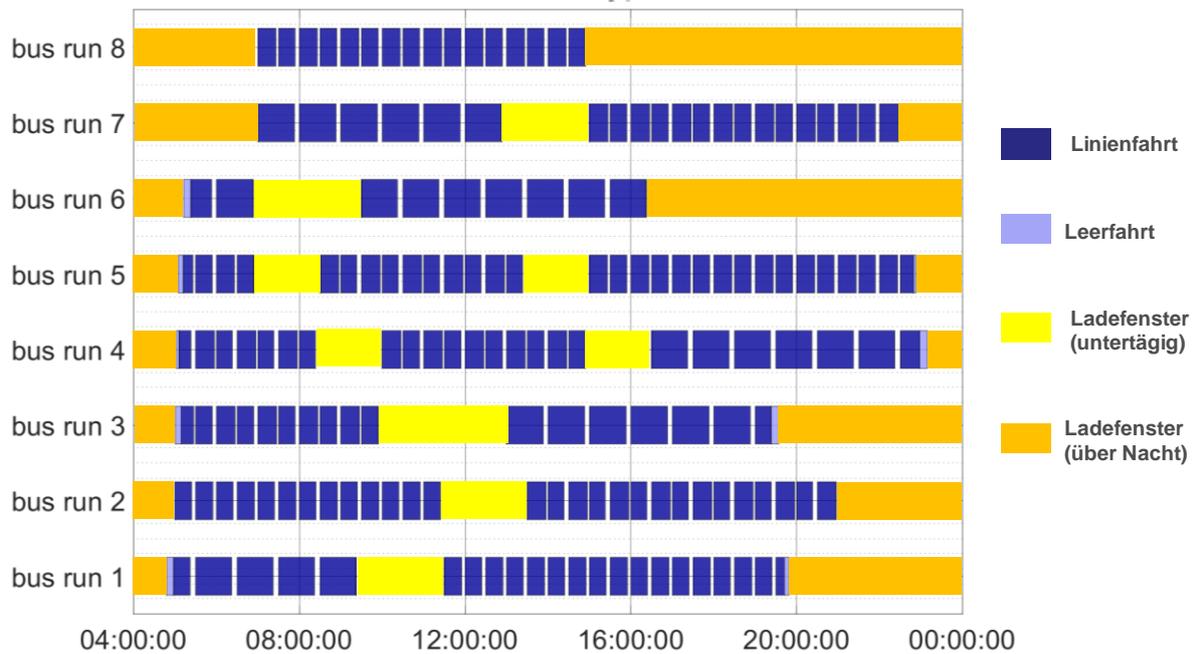


Abbildung 32: Betrieb mit Batteriebus 3, 150 kW Ladeleistung und Hybridheizung - Rendezvous-Platz

### 3.3 Detailergebnisse Schnellladung

Alternativ zur Standardladung mit geringen Ladeleistungen wurde weiterhin der Einsatz von Schnellladekonzepten geprüft. Zusätzlich zu den Batteriebussen 2 und 3 wird für die Schnellladung ebenfalls der Batteriebus 1 analysiert. Analog zu der Betrachtung der Konzepte mit Standardladung werden die Ladeorte in der *Sophie-Krämer-Straße* als auch am *Rendezvous-Platz* untersucht. Referenz und Ausgangspunkt ist hier wieder der Betrieb mit Dieselfahrzeugen, der in Abbildung 29 dargestellt ist.

#### 3.3.1 Ergebnisse Schnellladung Abstellhalle Sophie-Krämer-Straße

Zunächst werden Schnellladesysteme an der Abstellhalle diskutiert. Vergleichbar mit Kapitel 3.2.1 wird als erstes der energetisch und betrieblich anspruchsvollste Fall betrachtet. Dies entspricht Batteriebus 1 mit einer Ladeleistung von 300 kW und einem vollelektrischen Heizsystem. Neben der Variation der Batteriekapazität werden für die Schnellladerkonzepte ebenfalls die Ladeleistungen variiert und verglichen. In Abbildung 33 ist das Betriebskonzept für diese Elektrifizierungslösung dargestellt. Anders als für den energetisch anspruchsvollsten Fall der Standardladung, benötigt diese Fahrzeugkonfiguration lediglich acht Busse für den Fahrbetrieb der INGO-Linien. Die halbstündige Pausenzeit zwischen jedem „Treffen“ am *Rendezvous-Platz* bietet jedoch nicht ausreichend Zeit, um zur Abstellhalle zu fahren, nachzuladen und anschließend mit genügend Energie wieder den Betrieb aufzunehmen. Auch für Schnellladelösungen sind also betriebliche Anpassungen in Form von zusätzlichen Fahrzeugen und veränderten Umläufen notwendig.

Darüber hinaus steigt die Anzahl der Ladefenster stark an. Während für vergleichbare Standardladerlösungen ca. 15 bis 18 Ladefenster benötigt werden, müssen die Fahrzeuge für dieses Konzept 42-mal in die Abstellhalle zurückfahren um nachzuladen. Dies liegt in der geringeren Batteriekapazität der Fahrzeugkonfigurationen mit Schnellladung (vgl. Kapitel 2.2.1) begründet, da sich hierdurch die Reichweiten ohne Zwischenladung verkürzen. Infolge dessen steigt die Anzahl der Leerfahrten, und die Leerkilometer verdoppeln sich nahezu.

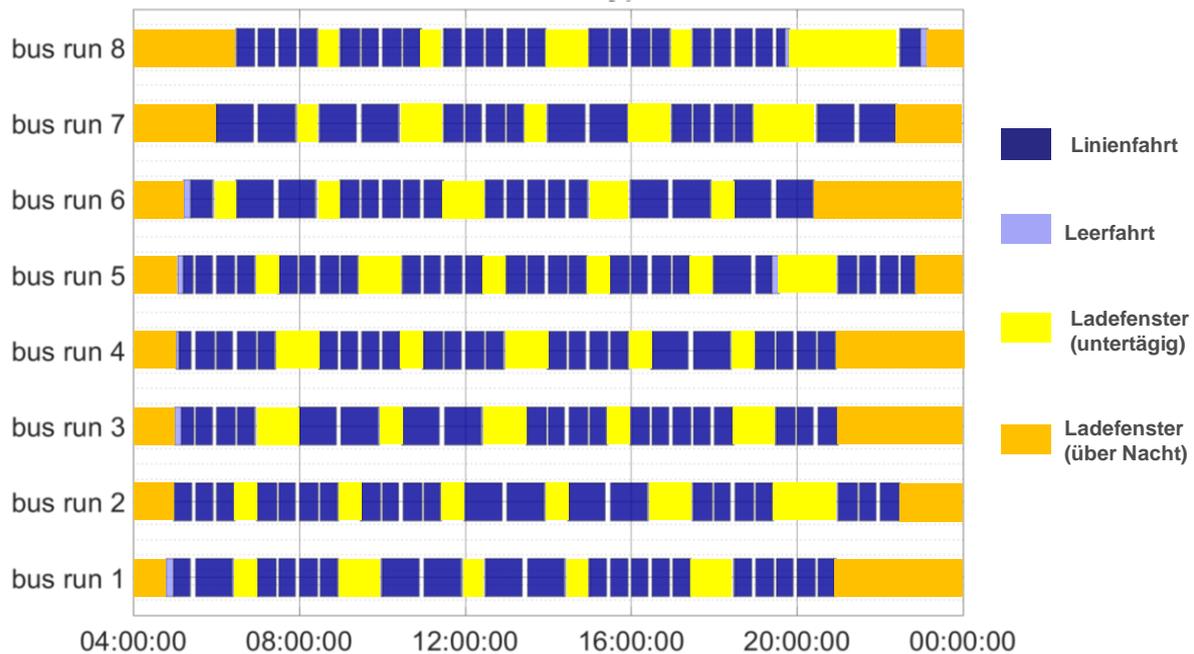


Abbildung 33: Betrieb mit Batteriebus 1, 300 kW Ladeleistung und vollelektrischer Heizung - Abstellhalle

Bei einer Erhöhung der Ladeleistung reduzieren sich die Dauer und die Häufigkeiten der Ladefenster. In Abbildung 34 ist die Konfiguration für Batteriebus 1 mit 450 kW Ladeleistung sowie Hybridheizung gezeigt. Durch die Hybridheizung wird der elektrische Energiebedarf reduziert, wodurch sich die Reichweite des Batteriebusse ohne Zwischenladung verlängert. Weiterhin kann während der Ladephasen mehr Energie in das Fahrzeug geladen werden, so dass dieses den Liniendienst früher wiederaufnehmen kann. Insgesamt reduziert sich somit die Häufigkeit der Ladefenster auf die Anzahl 26. Für Konzepte mit Standardladung werden jedoch ebenfalls zusätzliche Ladefenster benötigt, wodurch aufgrund des Ein- und Ausrückens der Fahrzeuge aus der Abstellhalle die Leerkilometer ansteigen.

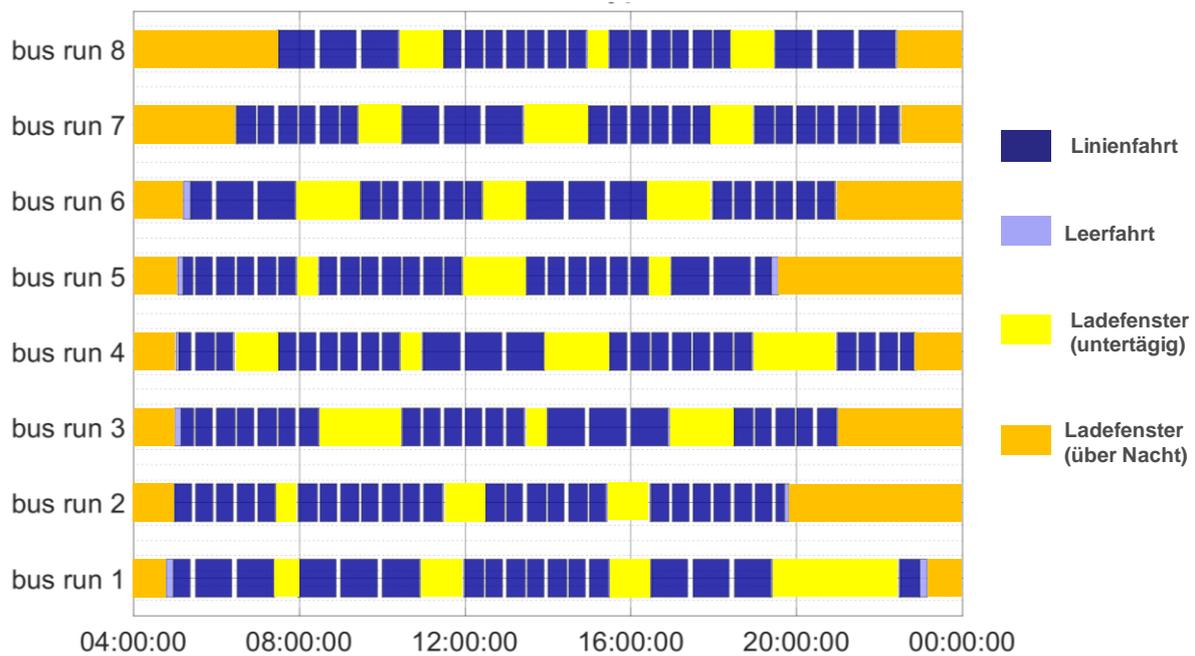


Abbildung 34: Betrieb mit Batteriebus 1, 450 kW Ladeleistung und Hybridheizung - Abstellhalle

Die Fahrzeuganzahl der Konzepte mit Schnellladung liegt generell bei acht Fahrzeugen. Auch im energetisch günstigsten Fall (Batteriebus 3, 450 kW Ladeleistung, Hybridheizung) können für eine Nachladung an der Abstellhalle keine Fahrzeuge eingespart werden. Nur die Anzahl und Dauer der Ladefenster können durch die Erhöhung der Ladeleistung bzw. der Batteriekapazität gesenkt werden. In Abbildung 35 ist der beschriebene Fall dargestellt.

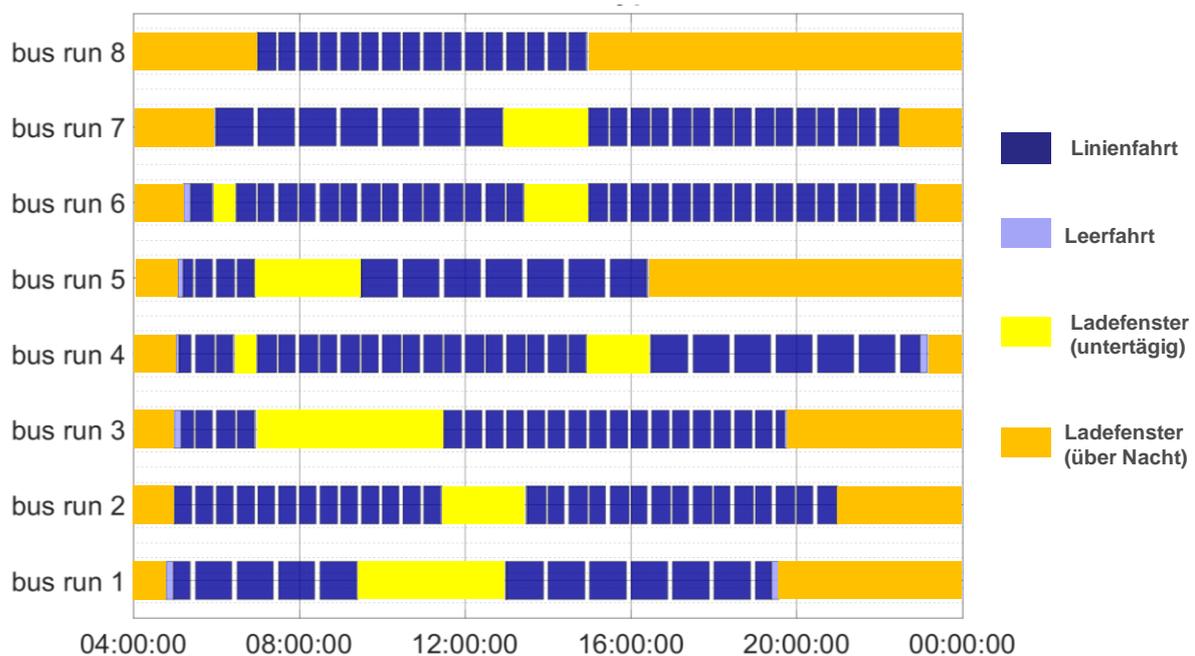


Abbildung 35: Betrieb mit Batteriebus 3, 450 kW Ladeleistung und Hybridheizung - Abstellhalle

### 3.3.2 Ergebnisse Schnellladung Rendezvous-Platz

Abschließend werden die Ergebnisse der Schnellladelösungen mit Nachladung am *Rendezvous-Platz* vorgestellt. Vergleichbar zu den Ergebnissen der Standardladung können bis auf eine Ausnahme keine Fahrzeuge durch Nachladung am *Rendezvous-Platz* eingespart werden. Technologieunabhängig werden acht Busse benötigt. Die Batteriegröße und die Ladeleistung haben nur Einfluss auf die Dauer und Häufigkeiten der untertägigen Ladefenster.

Einziges Ausnahmefall ist der energetisch günstigste Fall (Batteriebus 3, 450 kW Ladeleistung und Hybridheizung). Mit dieser Elektrifizierungslösung werden, im Vergleich zum Betrieb mit Dieselsebussen, keine zusätzlichen Fahrzeuge benötigt und die Linienfahrleistung kann mit sieben Bussen erbracht werden. Betriebliche Anpassungen erfolgen dabei nur bei der Umlaufbildung der Fahrzeuge. Die halbstündigen Pausenzeiten reichen für dieses Szenario aus, um genügend Energie in das Fahrzeuge zu laden und somit den nächsten Umlauf erbringen zu können. In Abbildung 36 wird die Umlaufplanung dieses Konzepts dargestellt.

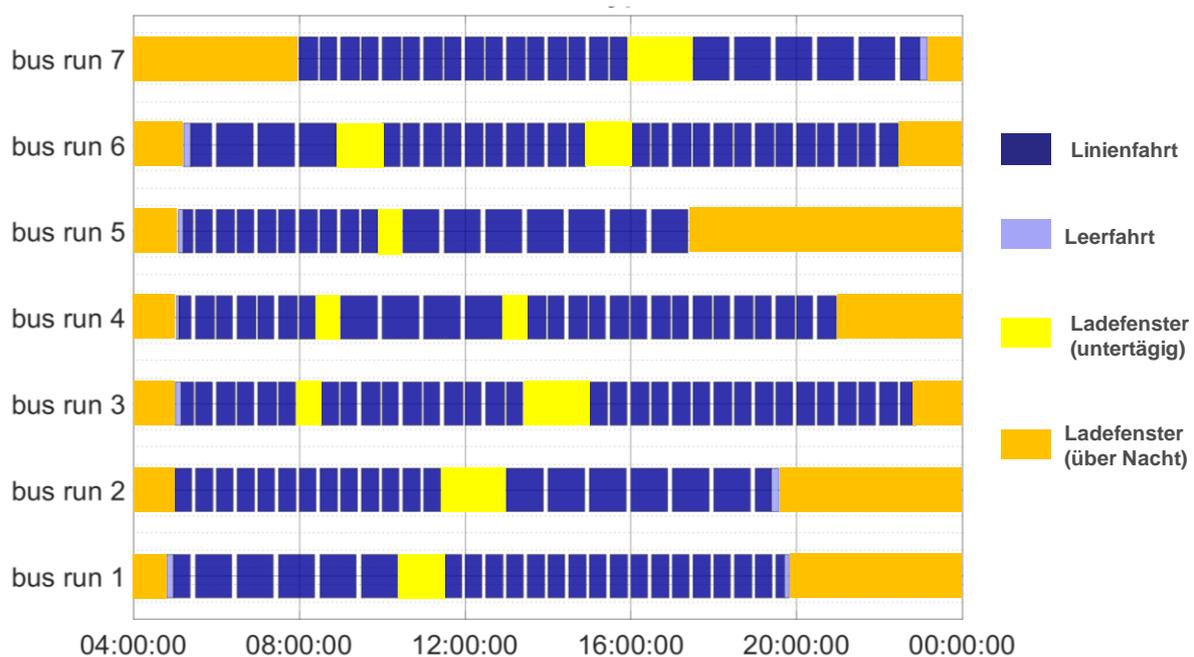


Abbildung 36: Betrieb mit Batteriebus 3, 450 kW Ladeleistung und Hybridheizung - Rendezvous-Platz

### 3.4 Ergebnisse Brennstoffzellenbusse

Aufgrund der hohen Energiedichte von Wasserstoff haben Brennstoffzellenbusse eine höhere Reichweite als Batteriebusse. Die Überprüfung der technischen Machbarkeit hat ergeben, dass der Einsatz von Brennstoffzellenbussen für die Fahrleistung der INGO-Linien ohne zusätzliche Fahrzeuge und ohne betriebliche Anpassungen möglich ist. Dies gilt sowohl für Brennstoffzellenhybridbusse als auch Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender. Die originalen Dieselsebumläufe (siehe Abbildung 29) können daher beibehalten werden.

### 3.5 Auswirkungen der Ladefenster auf die Dienste der Fahrer

Wie in den Kapiteln 3.2 und 3.3 beschrieben werden für Batteriebusse untertägige Ladefenster und Nachladephasen notwendig. Hierdurch kann die aktuelle Dieselkonfiguration nicht weitergefahren werden und betriebliche Anpassungen müssen erfolgen. Die Restrukturierung der Umlaufplanung hat jedoch ebenfalls Einfluss auf die Dienste der Fahrer, da die originale Einsatzplanung der Dieselfahrzeuge auf den Dienstplänen basiert. In Abbildung 37 sind die einzelnen INGO-Dienste dargestellt, wobei zwei Dienste einem Bus zugeordnet sind. Dies bedeutet, dass die Fahrer im Zuge ihres Fahrdienstes einen festgelegten Bus nutzen und diesen währenddessen nicht tauschen müssen. Insgesamt werden 14 Dienste (jeweils 7 Vormittags- und Nachmittagsdienste) für die INGO-Linien eingesetzt.

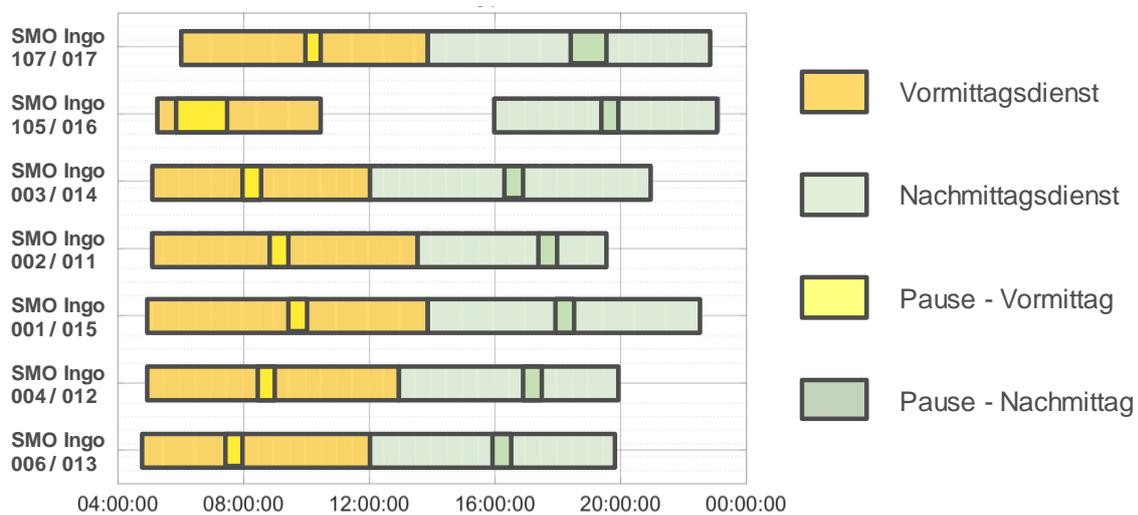


Abbildung 37: Gestaltung der INGO-Fahrdienste

Für den Einsatz der Batteriebusse kann diese Planung jedoch nicht beibehalten werden. Durch die Nutzung zusätzlicher Fahrzeuge und die Integration von Ladefenstern müssen die Fahrer innerhalb ihres Dienstes Busse tauschen. Die Anzahl der Tausche hängt hierbei direkt von der Anzahl der untertägigen Ladefenstern ab. Je öfter ein Fahrzeug nachgeladen werden muss, desto häufiger muss die Person während ihres Dienstes den Bus tauschen. Je nachdem, an welchem Ort nachgeladen wird, hat dies Einfluss auf die Anzahl der Dienste sowie die Handhabung der Fahrer.

Sofern am *Rendezvous-Platz* nachgeladen wird, müssen die Fahrer teilweise nach den Pausen sowie zwischen den Linienfahrten das Fahrzeug wechseln. Eine Bindung zwischen Fahrzeug und Fahrer ist dann nicht mehr gegeben. Da für den Wechsel eines Fahrzeugs (Parken, Kontaktieren zur Ladeinfrastruktur, Fahrzeugwechsel) ca. zwei bis vier Minuten benötigt werden, können die Tausche innerhalb der bezahlten Arbeitszeit erfolgen. Aufgrund dessen werden in der folgenden Wirtschaftlichkeitsrechnung (AP 3) für das Szenario, welches eine Nachladung am *Rendezvous-Platz* beinhaltet, keine zusätzlichen Fahrerkosten im Vergleich zum Betrieb mit Dieselfbussen berechnet.

Für die Nachladung an der Abstellhalle kann die bisherige Dienstplanung in dieser Form nicht aufrechterhalten werden. Die Zeit, um die Fahrzeuge vom *Rendezvous-Platz* zur Abstellhalle zu fahren, das Fahrzeug an die Ladeinfrastruktur zu koppeln und genügend Pausenzeit für den das Fahrpersonal in den Ablauf zu integrieren, übersteigt die vorhandene Zeit zwischen Aus- und Einsetzten des Liniendienstes der Fahrer. (In der ursprünglichen Dieselpassung wurde dieses Zeitfenster zur Pause am *Rendezvous-Platz* genutzt.) Aufgrund dessen werden zwei zusätzliche Fahrer und somit zwei zusätzliche Dienste (je ein Vor- und Nachmittagsdienst) benötigt. Die daraus entstehenden zusätzlichen Kosten werden in der Wirtschaftlichkeitsanalyse erfasst.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist neben dem Auftreten der Fahrzeugtausche, die Häufigkeit der jeweiligen Fahrzeugtausche. Ein ständiger Fahrzeugwechsel zwischen Linienfahrten ist zum einen für die Fahrer nicht zumutbar und zum anderen können evtl. anfallende Verspätungen nur erschwert ausgeglichen werden. Wie beschrieben hängt die Anzahl der Fahrzeugtausche direkt von der Häufigkeit der Ladefenster ab. Diese wiederum werden direkt durch die Reichweite der Fahrzeuge beeinflusst. Insbesondere die geringe Batteriekapazität des Batteriebus 1 sorgt für viele Ladefenster innerhalb des Betriebs und entsprechend viele Fahrzeugtausche. In Abbildung 38 werden die notwendigen Bustausche im Liniendienst für Batteriebus 1 mit 300 kW Ladeleistung und Hybridheizung exemplarisch gezeigt. Insgesamt müssen die Fahrer für dieses Konzept während des Liniendienstes 20-mal die Fahrzeuge tauschen. Neben den Tauschen im Liniendienst müssen die Fahrer darüber hinaus die Fahrzeuge nach ihren Pausen wechseln. Insbesondere für „SMO Ingo 002“ werden 3 Tausche im Liniendienst notwendig. Für Konzepte mit höherer Batteriekapazität können diese reduziert werden. Elektrifizierungslösungen mit kleinem Batteriesystem wurden somit als nicht sinnvoll eingeschätzt. Als Folge dessen wurden Konzepte mit kleiner Batterie in den künftigen Analysen (AP 3) nicht weiter untersucht.

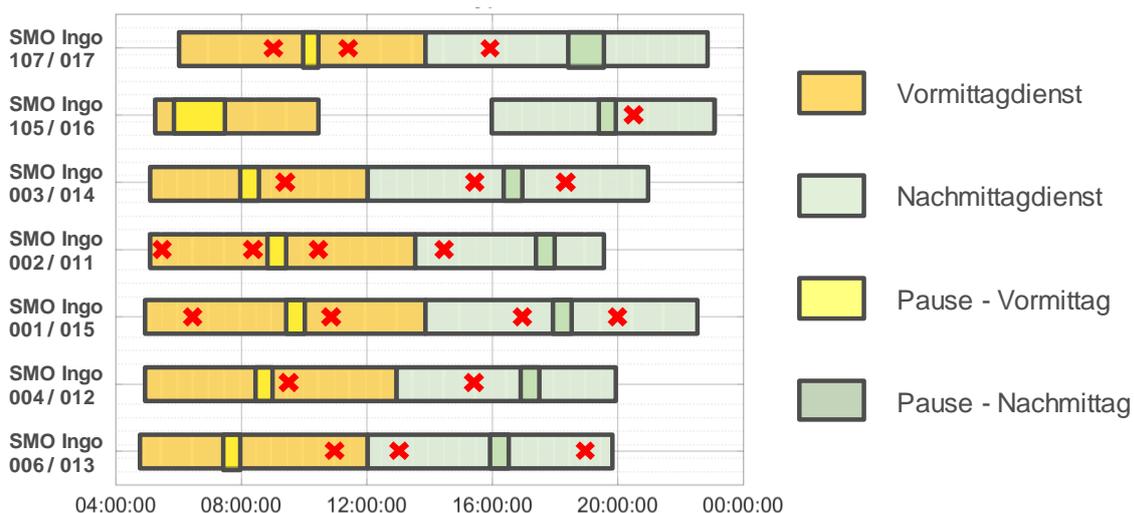


Abbildung 38: Fahrzeugwechsel im Liniendienst - Batteriebus 1, Ladeleistung 300 kW, Hybridheizung

### 3.6 Ergebnisübersicht und Diskussion

Die zuvor vorgestellten Detailanalysen beschreiben den Einfluss von Elektrifizierungskonzepten, Fahrzeugkonfigurationen und Ladeorten auf die resultierenden betrieblichen Anpassungen hinsichtlich Fahrzeugbedarf, Leerkilometer und Fahrerzeit. Als Referenz wurde der Dieselbusbetrieb mit Euro VI-Fahrzeugen herangezogen. Die Dieselbusse haben aufgrund der hohen Reichweite kaum betriebliche Einschränkungen, weshalb das Dieselbusbetriebskonzept die Untergrenze bezüglich der Fahrzeuganzahl definiert.

In Tabelle 8 bis Tabelle 11 sind die Fahrzeugbedarfe aller untersuchten Elektrifizierungslösungen abgebildet. Aufgrund der höheren Reichweite von Brennstoffzellenbussen kann ein Betrieb mit diesen Elektrifizierungslösungen ohne zusätzliche Fahrzeuge durchgeführt werden. Darüber hinaus sind keine betrieblichen Anpassungen notwendig und die originalen Dieselmotorsumläufe können in ihrer ursprünglichen Form beibehalten werden.

Konzepte mit Batteriebusen benötigen, im Vergleich zum Dieselbusbetrieb, zusätzliche Fahrzeuge und betriebliche Anpassungen. Beim Vergleich der beiden Ladeorte wird ersichtlich, dass aufgrund der geringen Distanz zwischen Abstellhalle und *Rendezvous-Platz* nahezu keine Fahrzeuge eingespart werden können, so dass der Fahrzeugmehrbedarf in den meisten Fällen unabhängig vom Ladeort identisch bleibt.

Weiterhin gilt für die meisten Konfigurationen der Standardladung, dass im Vergleich zum Dieselbusbetrieb zwei zusätzliche Fahrzeuge benötigt werden. Nur für den energetisch und betrieblich günstigsten Fall, in dem die größte Batteriekonfiguration sowie ein Hybridheizungskonzept verwendet wird, werden insgesamt lediglich acht Busse benötigt, um die Linienfahrleistung der INGO-Linien mittels Standardladung zu erbringen.

Im Vergleich zwischen Standardladung und Schnellladung lässt sich weiterhin feststellen, dass die Ladefenster durch den Einsatz von höheren Ladeleistungen zeitlich reduziert werden und dadurch der Fahrzeugbedarf gesenkt werden kann. Bei einem Einsatz von hohen Ladeleistungen hat die Batteriekapazität wiederum keinen Einfluss auf den Fahrzeugbedarf. Technologieunabhängig werden für den Betrieb der INGO-Linien acht Busse bei einem Einsatz von Schnellladung benötigt. Nur mit der energetisch günstigsten Konfiguration (größte Batteriekapazität, 450 kW Ladeleistung, Hybridheizung und Nachladung am *Rendezvous-Platz*) kann ein Betrieb ohne zusätzliche Fahrzeuge durchgeführt werden.

Höhere Batteriekapazitäten haben nahezu keinen Einfluss auf den Fahrzeugbedarf, jedoch können dadurch die Ladehäufigkeit und -dauer reduziert werden. Durch höhere Reichweiten können Fahrzeuge länger genutzt werden ohne nachgeladen werden zu müssen. Dadurch können längere Umläufe der Fahrzeuge gebildet werden. Durch diese reduzierte Ladehäufigkeit werden die Fahrzeugtausche minimiert und die betrieblichen Anpassungen reduziert.

Fahrzeug-konzept	Lade-Leistung	Heiz-konzept	Sophie-Krämer-Straße		Rendezvous-Platz	
			Fahrzeugbedarf	Mehr-bedarf	Fahrzeugbedarf	Mehr-bedarf
Diesel			7	-	7	-
Batteriebus 1	300 kW	ElHe	8	1	8	1
		HyHe	8	1	8	1
	450 kW	ElHe	8	1	8	1
		HyHe	8	1	8	1

Tabelle 8: Fahrzeugbedarf Batteriebus 1

Fahrzeug-konzept	Lade-Leistung	Heiz-konzept	Sophie-Krämer-Straße		Rendezvous-Platz	
			Fahrzeugbedarf	Mehr-bedarf	Fahrzeugbedarf	Mehr-bedarf
Diesel			7	-	7	-
Batteriebus 2	150 kW	ElHe	9	2	9	2
		HyHe	9	2	9	2
	300 kW	ElHe	8	1	8	1
		HyHe	8	1	8	1
	450 kW	ElHe	8	1	8	1
		HyHe	8	1	8	1

Tabelle 9: Fahrzeugbedarf Batteriebus 2

Fahrzeug-konzept	Lade-Leistung	Heiz-konzept	Sophie-Krämer-Straße		Rendezvous-Platz	
			Fahrzeugbedarf	Mehr-bedarf	Fahrzeugbedarf	Mehr-bedarf
Diesel			7	-	7	-
Batteriebus 3	150 kW	ElHe	9	2	9	2
		HyHe	8	1	8	1
	300 kW	ElHe	8	1	8	1
		HyHe	8	1	8	1
	450 kW	ElHe	8	1	8	1
		HyHe	8	1	7	-

Tabelle 10: Fahrzeugbedarf Batteriebus 3

Fahrzeugkonzept	Sophie-Krämer-Straße	
	Fahrzeugbedarf	Mehrbedarf
Diesel	7	-
Brennstoffzellenhybridbus	7	-
Batteriebus mit Brennstoffzellen-Range-Extender	7	-

Tabelle 11: Fahrzeugbedarf Brennstoffzellenbusse

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es bereits mit Hilfe der heutigen Technologie möglich ist, den Fahrbetrieb der INGO-Linien vollständig zu elektrifizieren. Bei einem Einsatz von Brennstoffzellenbussen sind keine betrieblichen Anpassungen oder zusätzlichen Fahrzeuge notwendig. Eine Elektrifizierung mittels Batteriebussen erfolgt hingegen nur im Zuge

betrieblicher Anpassungen, wodurch bei nahezu allen untersuchten Lösungen der Fahrzeugbedarf im Vergleich zum Betrieb mit Dieselbussen, ansteigt. Weiterhin gilt, dass bei dem Einsatz von Standardladern ca. neun Fahrzeuge und bei der Nutzung von Schnellladung acht Fahrzeuge benötigt werden. Elektrifizierungskonzepte, bei denen eine Hybridheizung zum Einsatz kommt, können nur vereinzelt den Fahrzeugbedarf senken. Da aber insbesondere unter anspruchsvollen Bedingungen (wie einer hohen Nebenverbraucherleistung) der elektrische Energiebedarf gesenkt werden kann, werden die Anzahl und die Umfänge von Ladefenstern durch den Einsatz einer Hybridheizung reduziert.

Die in der technischen und betrieblichen Analyse (AP 2) dargestellten Ergebnisse beschreiben insbesondere die notwendigen Anpassungen des Betriebs mit Dieselbussen. Für eine vollständige Bewertung der Elektrifizierungslösungen müssen sowohl die Kosten als auch die Umweltauswirkungen hinzugezogen und berücksichtigt werden (AP 3). Auf dieser Basis können Technologieempfehlungen abgeleitet werden, die in die Erarbeitung eines Umstellungskonzepts einfließen (AP 4).

## 4. Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkungen (AP 3)

In den vorhergehenden Arbeitspaketen wurden die technischen und betrieblichen Konsequenzen einer Elektrifizierung mit den unterschiedlichen Elektrobuskonzepten ermittelt. Welches Konzept zu bevorzugen ist, lässt sich jedoch erst durch einen Vergleich zwischen Wirtschaftlichkeitsrechnung und der Ermittlung der Umweltauswirkungen feststellen. Nachfolgend sind die Methodiken, Annahmen und die Ergebnisse der Kosten- und der Emissionsrechnung dargestellt.

### 4.1 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Auf Basis der Ergebnisse der technischen und betrieblichen Analyse wurde für jedes Elektrifizierungskonzept die Total Costs of Ownership (TCO) bestimmt. Die TCO entsprechen der Summe der diskontierten Zahlungsflüsse, die für die unterschiedlichen Buskonzepte anfallen. Sie umfassen dabei alle Kosten, die während des gesamten Betrachtungszeitraums aufkommen. Neben den Anfangsinvestitionen sind somit auch Ausgaben für Ersatzbeschaffungen von Batterien und Brennstoffzellen sowie Energiekosten und Instandhaltungsausgaben enthalten. Darüber hinaus werden die gesamten Fahrerkosten auf Basis der bezahlten Arbeitszeit der INGO-Dienste sowie die zusätzlichen Fahrerkosten, entstehend durch die Ladephasen sowie Fahrzeugtausche, betrachtet. Um die Kosten miteinander zu vergleichen, werden die TCO als Annuitäten pro Nutzkilometer angegeben.

Innerhalb der Kostenrechnung werden drei unterschiedliche Förderszenarien betrachtet. Zum einen werden die Konzepte ohne jegliche Art von Förderung untersucht. Zum anderen werden zwei unterschiedliche Bundesförderprogramme in die Kostenrechnung miteinbezogen. Das Förderprogramm des „Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur“ (BMVi) fördert Elektrobusprojekte mit der Übernahme von 40 Prozent der Fahrzeugmehrkosten und 40 Prozent der Kosten für die notwendige Ladeinfrastruktur. Das Förderprogramm des „Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit“ (BMU) fördert lediglich Batteriebusse durch die Übernahme von 80 Prozent der Fahrzeugmehrkosten sowie Ladeinfrastruktur durch die Übernahme von 40 Prozent der anfallenden Kosten. Für Brennstoffzellenfahrzeuge müssen alternative Förderprogramme (bspw. FCH JU – Jive 2 der Europäischen Union) genutzt werden. Da sich die beiden Bundesförderprogramme in der Förderquote der Fahrzeugmehrkosten unterscheiden, werden das Förderprogramm des BMVi mit „Förderquote 40 Prozent“ und das des BMU mit „Förderquote 80 Prozent“ in den folgenden Betrachtungen abgekürzt.



Abbildung 39: Aufschlüsselung der betrachteten Kostenanteile

### 4.1.1 Kostenannahmen

Im Folgenden sind die Annahmen aufgeführt, welche zur Berechnung der Total-Costs-of-Ownership (TCO) in der Wirtschaftlichkeitsanalyse herangezogen wurden. In der Studie wurde ein effektiver Kalkulationsansatz von 5 Prozent verwendet, und der Betrachtungszeitraum wurde mit 12 Jahren gewählt.

#### 4.1.1.1 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 dessen Ersatzbeschaffung werden in der Kostenanalyse gesondert berücksichtigt. Bei dem Dieselferenzbus erfolgt diese Unterteilung nicht.

Tabelle 12 gibt einen Überblick über die angenommenen Investitions- und Instandhaltungskosten. Hierbei werden die Fahrzeuganschaffungspreise sowohl inklusive als auch exklusive des Batterie- bzw. Brennstoffzellensystems abgebildet.

Technologie	Fahrzeugpreis (exkl. Batterie-/ BZ-System) in €	Fahrzeugpreis (inkl. Batterie-/ BZ-System) in €	Fahrzeugpreis (inkl. Förderquote 40 % - BMVi)	Fahrzeugpreis (inkl. Förderquote 80 % - BMU)	Instandhaltung in €/km
Dieselreferenz	300.000	300.000	300.000	300.000	0,40
Batteriebus 2	350.000	537.500	442.500	347.500	0,40
Batteriebus 3	350.000	612.500	487.500	362.500	0,4
BZ-Hybrid	400.000	672.500	523.500	374.500	0,5
BZ-RE	400.000	655.000	513.000	371.500	0,5

Tabelle 12: Kostenannahmen Fahrzeuge (inkl. Nachrichtentechnik, mit und ohne Batterie-/Brennstoffzellensystem) und Instandhaltung

Die Investitionskosten für einen Elektrobuss sind derzeit ca. doppelt so hoch wie für einen Diesellbus. 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 fallen in den nachfolgenden Berechnungen für jeden zurückgelegten Kilometer (Leer- und Nutzungskilometer) an. Die Instandhaltungskosten der Diesellbusse wurden für Solobusse auf 0,40 €/km beziffert. Bezüglich der Instandhaltungskosten der Elektrobussysteme gibt es bislang noch keine belastbaren Aussagen. Der elektrische Antrieb selbst bietet zwar grundsätzlich das Potential für einen wartungsärmeren Betrieb als er mit konventionellen Antrieben gegeben ist; ein nicht unerheblicher Teil dieser Wartungs- und Instandhaltungskosten resultiert jedoch aus Komponenten, die nicht direkt dem Antrieb zugeordnet sind (Türantriebe, etc.). Weiterhin kommen mit einem Koppelsystem für die Ladung von Batteriebussen neue Komponenten in die Fahrzeuge, die einer regelmäßigen Wartung bedürfen.

Aufgrund dessen werden die Instandhaltungskosten pro gefahrenem Kilometer für Batteriebusse auf dem gleichen Niveau wie für Diesellbusse 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 0,10 €/km höher angesetzt als die der Diesel- oder reinen Batteriebusse.

An dieser Stelle ist zu beachten, dass in der hiesigen Studie der Aufwand für den Austausch von Batterie- und Brennstoffzellensystemen nicht als Instandhaltungskosten angesetzt wurde, sondern dass der Austauschbedarf separat ermittelt wurde und unter die Rubrik „Batterie- und Brennstoffzellenkosten“ fällt.

Für die Diesellbusse wird nach einer achtjährigen Nutzungsdauer ein Restwert von 25 Prozent des Kaufpreises unterstellt. Für die Elektrobusse wurde eine Nutzungsdauer von 12 Jahren hinterlegt, welche dem Betrachtungszeitraum entspricht. Der Restwert der Elektrobusse nach deren zwölfjähriger Nutzung wurde zu 0 Prozent definiert.

### 4.1.1.2 Batterie- und Brennstoffzellenkosten

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

Die Kostenannahme für die Beschaffung eines Batteriesystems belaufen sich auf 750 €/kWh. Die Bewertung der Batterielebensdauer erfolgt auf Basis der jeweiligen Nutzung im Liniendienst. Die Lebensdauer ist dabei durch äquivalente Vollzyklen (Anzahl möglicher Kapazitätsdurchsätze bezogen auf die Anfangskapazität) abgebildet. Bei der Kostenrechnung erfolgt auf dieser Grundlage eine Bestimmung der benötigten Ersatzbeschaffungen für jede Linie und jedes Fahrzeugkonzept individuell. In der Studie wird eine Batterielebensdauer von 2.500 äquivalenten Vollzyklen angenommen.

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, Lebensdauern von über 25.000 Betriebsstunden zu erzielen, welche für die Studie angenommen wurden. Wie auch für die Batteriesysteme erfolgt die Bestimmung von Austauschintervallen im Rahmen dieser Studie anhand der tatsächlichen Belastung (hier der Betriebsstunden).

Um den potentiellen Markthochlauf entsprechend zu berücksichtigen, wurde für die Batterie- und Brennstoffzellensysteme im zwölfjährigen Betrachtungszeitraum ein linearer Preisverfall von 30 Prozent 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 Annahme wird der Effekt des fixen Betrachtungszeitraums von 12 Jahren abgemildert. Ansonsten würden sich Batterie-neubeschaffungen nach bspw. 11 Jahren sehr nachteilig auf die Kosten auswirken.

### 4.1.1.3 Energiekosten

Im Rahmen der Studie werden die Energiekosten für unterschiedliche Energieträger betrachtet. Die Kosten für den Energieträger „Diesel“ werden, in Absprache mit *Saar-Mobil* und der Stadt St. Ingbert, zu 1,00 €/l angenommen.

Die Kosten für den Strombezug hängen von mehreren Faktoren ab. Der erste Faktor ist der Strompreis pro bezogener Kilowattstunde Energiemenge. In dieser Studie wird mit einem

Strompreis von 18,09 ct/kWh kalkuliert<sup>3</sup>. Neben dem Energiepreis fallen auch leistungsbezogene Netzaufgaben an, welche von der jeweiligen Netzebene abhängen. Diese belaufen sich auf 12,24 €/kW<sup>4</sup>.

Die Energiekosten des benötigten Wasserstoffs werden zu 10,00 €/kg angenommen. Die konservative Abschätzung berücksichtigt dabei eine perspektivische Nachtankung mit „grünem“ statt mit „grauem“ Wasserstoff.

Um eine gute Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wird die jährliche Steigerung der Energiekosten für alle Energieträger zu 5,24 Prozent angenommen. Die Steigerung basiert auf dem Mittelwert der durchschnittlichen Strompreissteigerungen der letzten 10 Jahre. Insbesondere für den Dieselpreis ist dieser Wert hoch angesetzt,<sup>5</sup> da im Kontext des Klimaschutzpaketes derzeit eher konservative Annahmen sinnvoll sind.

### 4.1.1.4 Infrastrukturkosten für Batteriebusse

Ladeinfrastruktur für Batteriebusse wird in verschiedenen Leistungsklassen angeboten. In der Studie wurden Ladegeräte mit drei unterschiedlichen Ausgangsladeleistungen betrachtet (150 kW, 300 kW und 450 kW). In Tabelle 13 sind die Kostenannahmen für die verschiedenen Leistungsklassen sowie die Kontaktierungstechnik dargestellt. Die Kostenannahmen umfassen die komplette Hardware, deren Errichtung und die Inbetriebnahme. Für die Instandhaltung wurden jeweils 5 Prozent der Anschaffungskosten angenommen.

Leistungsklasse	Anschaffungspreis in €	Anschaffungspreis inkl. Förderung (FQ: 40%) in €	Kontaktierungstechnik
150 kW	97.500	58.500	CCS – Stecker
300 kW	195.000	117.000	Lademast und Ladehaube
450 kW	292.500	175.500	Lademast und Ladehaube

Tabelle 13: Kostenannahmen Ladeinfrastruktur für Batteriebusse

Zur vollständigen Berechnung der Infrastrukturkosten müssen neben den Kosten für Ladegeräte ebenfalls die Kosten für den Netzanschluss betrachtet werden. Darunter fallen insbesondere der Baukostenzuschuss, der Netzanschlusskostenbeitrag sowie die Kosten zur Errichtung der Stromversorgungsinfrastruktur. Der Netzanschlusskostenbeitrag und die Kosten für die Stromversorgungsinfrastruktur sind abhängig vom Ladeort. In Tabelle 14 sind die Kosten für die einzelnen Elemente des Netzanschlusses aufgezeigt.

---

<sup>3</sup> Annahme: Industriestrompreis 2019 abzgl. Stromsteuerreduktion für Elektrobusse von 0,91 ct/kWh

<sup>4</sup> Stadtwerke St. Ingbert – Netzentgelte für den Netzzugang zum Elektrizitätsversorgungsnetz (Gültig ab 01.01.2020)

<sup>5</sup> Der Mittelwert der Dieselpreissteigerungen beläuft sich auf 1,57 %.

Ladeort	Baukostenzuschuss €/kW	Netzanschlusskostenbeitrag €/kW	Kosten für die Stromversorgungsinfrastruktur €/kW
Abstellhalle (Sophie-Krämer-Straße)	114,59	55,62	350
Rendezvous-Platz	114,59	27,83	700

Tabelle 14: Kosten Netzanschluss

### 4.1.1.5 Fahrerkosten

Ein weiterer erheblicher Kostenfaktor ist die Fahrerzeit. Die begrenzte Reichweite der Batteriebusse erfordert unter Umständen Anpassungen der Betriebsplanung, so dass sich ein erhöhter Bedarf an Leerfahrten und zusätzlicher Fahrerzeit ergeben kann. Insbesondere für eine untertägige Nachladung an der Abstellhalle werden zusätzliche Dienste notwendig. Die Gesamtfahrerkosten wurden hierbei auf Basis der bezahlten Arbeitszeit der INGO-Dienste berechnet.

In Absprache mit *Saar-Mobil* wurden in der Studie konstante Fahrerkosten zu 35,00 €/h angenommen, welche höher sind als die aktuellen Fahrerkosten bei *Saar-Mobil*. Die Kosten wurden konservativ beziffert, um zukünftige Kostensteigerungen abzubilden.

### 4.1.2 Wirtschaftlichkeitsrechnung Batteriebusse – Szenario Abstellhalle

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung für drei unterschiedliche Szenarien vorgestellt, beginnend bei den Batteriebussen, die untertägig an der Abstellhalle nachladen. Danach wird das Szenario diskutiert, welches das Nachladen der Batteriebusse am *Rendezvous-Platz* beinhaltet. Als letztes werden die Ergebnisse für Brennstoffzellenfahrzeuge vorgestellt.

In Abbildung 40 werden die TCO der einzelnen Elektrifizierungslösungen mittels Batteriebusen für jenes Szenario gezeigt, in welchem die Nachladung an der Abstellhalle vollzogen wird und ohne Berücksichtigung einer Förderung. Die Darstellung erfolgt vergleichend mit dem derzeitigen Dieselbusbetrieb. Für die Konzepte mit Schnellladung gilt dabei, dass zusätzlich zu den Schnellladegeräten für jeweils zwei Fahrzeuge ein Ladegerät mit einer Ausgangsladeleistung von 150 kW für die Übernachtladung miteinkalkuliert wurde.

Aus der Abbildung sind deutliche Unterschiede zwischen dem Dieselbusbetrieb und den Elektrifizierungslösungen zu erkennen. Aufgrund der erhöhten Fahrzeuganzahl, der Errichtung von Ladeinfrastruktur sowie den zusätzlichen Diensten ist der Batteriebusbetrieb kostenintensiver als der Betrieb mit Dieselbussen. Es werden je nach Technologie zwischen 1 €/km bis 1,41 €/km zusätzlich nötig, um eine Elektrifizierung (ohne Förderung) durchzuführen.

Im Vergleich der einzelnen Elektrifizierungslösungen lässt sich feststellen, dass Konzepte mit Standardladung kostengünstiger sind als Konzepte mit Schnellladung. Obwohl in den meisten

Fällen ein Fahrzeug eingespart werden kann, sind die Errichtungskosten der Ladeinfrastruktur höher als die Kostenersparnisse durch die geringe Anzahl an Fahrzeugen. Darüber hinaus zeigt sich, dass Konzepte mit Hybridheizung günstiger sind als Konzepte mit vollelektrischer Heizung. Der Unterschied lässt sich hierbei auf einen Wert zwischen 1 ct/km bis zu 13 ct/km beziffern.

Das kostengünstigste Elektrifizierungskonzept wäre der Batteriebus 3 (350 kWh) mit Standardladung und Hybridheizung. Die Kosten für dieses Elektrifizierungskonzept liegen ohne Förderung bei 4,58 €/km und damit um 1 €/km höher als beim Dieselsebusbetrieb. Die jährlichen Mehrkosten belaufen sich bei den getroffenen Annahmen und einer Fahrleistung von ca. 500.000 km auf ca. 500.000 € ohne Förderung.

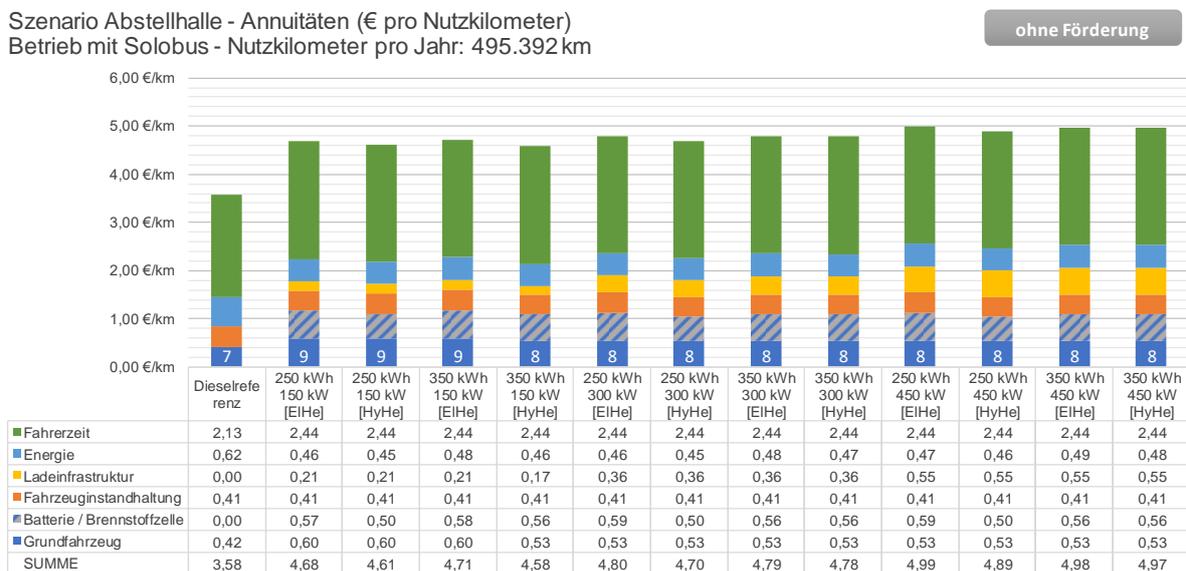


Abbildung 40: Batteriebusse mit Ladung an der Abstellhalle - Annuitäten in Euro pro Nutzkilometer (ohne Förderung)

Unter Berücksichtigung möglicher Förderungen reduzieren sich die Investitionskosten und somit ebenfalls die Annuitäten pro Nutzkilometer. In Tabelle 15 (für Standardladung) und in Tabelle 16 (für Schnellladung) werden die Auswirkungen möglicher Förderprogramme dargestellt. Die Elektrifizierungsoption mit Batteriebus 3 mit Standardladung und Hybridheizung bleibt auch unter Berücksichtigung der Förderprogramme das kostengünstigste Konzept. Die Lebenszykluskosten können hierbei auf 4,34 €/km (Förderquote 40 Prozent) bzw. 4,15 €/km (Förderquote 80 Prozent) gesenkt werden.

Förderquote	Dieselreferenz	250 kWh 150 kW ElHe	250 kWh 150 kW HyHe	350 kWh 150 kW ElHe	350 kWh 150 kW ElHe
Ohne Förderung	3,58	4,68	4,61	4,71	4,58
Förderquote: 40%	3,58	4,46	4,39	4,44	4,34
Förderquote: 80%	3,58	4,30	4,23	4,22	4,15

Tabelle 15: Batteriebusse mit Ladung an der Abstellhalle - Standardladung inkl. Förderung - Annuitäten in Euro pro Nutzkilometer

Förderquote	Dieselreferenz	250 kWh 300 kW ElHe	250 kWh 300 kW HyHe	350 kWh 300 kW ElHe	350 kWh 300 kW ElHe	250 kWh 450 kW ElHe	250 kWh 450 kW HyHe	350 kWh 450 kW ElHe	350 kWh 450 kW ElHe
Ohne Förderung	3,58	4,80	4,70	4,79	4,78	4,99	4,89	4,98	4,97
Förderquote: 40%	3,58	4,56	4,45	4,50	4,49	4,70	4,59	4,64	4,63
Förderquote: 80%	3,58	4,41	4,31	4,30	4,29	4,55	4,45	4,44	4,44

Tabelle 16: Batteriebusse mit Ladung an der Abstellhalle - Schnellladung inkl. Förderung - Annuitäten in Euro pro Nutzkilometer

#### 4.1.3 Wirtschaftlichkeitsrechnung Batteriebusse – Szenario Rendezvous-Platz

Nachdem die Ergebnisse für das Szenario mit Nachladung an der Abstellhalle vorgestellt wurden, werden nun die Ergebnisse für das Szenario mit Nachladung am *Rendezvous-Platz* präsentiert. In Abbildung 41 werden die entsprechenden TCO dargestellt. Die drei Konfigurationen, welche nicht abgebildet sind, benötigten gemäß technischer Machbarkeitsprüfung neun Fahrzeuge. Ihre Umsetzung ist am *Rendezvous-Platz* somit nicht möglich.

Auch für eine Nachladung am *Rendezvous-Platz* sind Elektrifizierungskonzepte kostenintensiver als die Dieselreferenz. Die Mehrkosten betragen, ohne Berücksichtigung einer Förderung, zwischen 0,79 €/km bis 1 €/km. Vergleichbar zu dem Szenario, in dem an der Abstellhalle nachgeladen wird, ist das kostengünstigste Konzept der Batteriebus 3 mit Standardladung und Hybridheizung. Die Annuitäten pro Nutzkilometer betragen für diese Konfiguration ohne Förderung 4,37 €/km.

Obwohl für das Szenario mit Nachladung am *Rendezvous-Platz* zusätzliche Ladeinfrastruktur benötigt wird, sind Konzepte mit diesem Ladeort kostengünstiger als Konzepte mit Nachladung an der Abstellhalle. Grund dafür sind die zusätzlichen Dienste, die bei einer Nachladung an der Abstellhalle notwendig werden. Durch die Einsparung der Arbeitszeit können die Kosten um ca. 5 Prozent reduziert werden. Die jährlichen Mehrkosten im Vergleich zur Dieselreferenz betragen hierbei ca. 390.000 € (ohne Förderung).

Unter Berücksichtigung möglicher Förderungen können aber auch hier die Kosten eingespart werden. Für das günstigste Konzept (Batteriebus 3, Standardladung und Hybridheizung) können die TCO auf 4,10 €/km (Förderquote 40 Prozent) bzw. 3,91 €/km (Förderquote 80 Prozent) gesenkt werden.

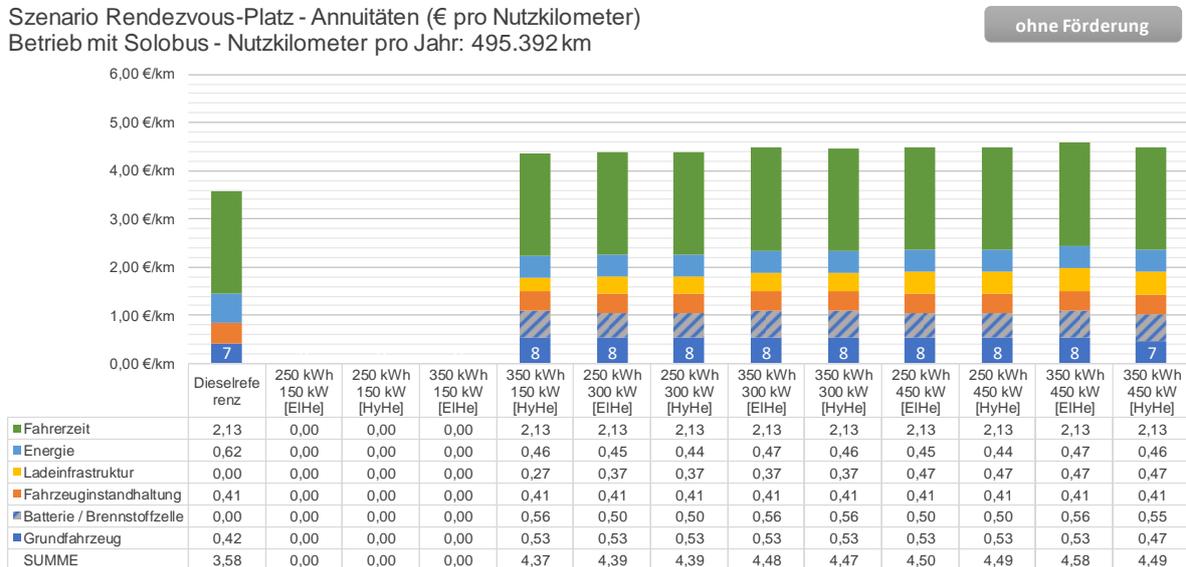


Abbildung 41: Batteriebusse mit Ladung am Rendezvous-Platz - Annuitäten in Euro pro Nutzkilometer (ohne Förderung)

Förderquote	Dieselreferenz	250 kWh 150 kW EIHe	250 kWh 150 kW HyHe	350 kWh 150 kW EIHe	350 kWh 150 kW EIHe
Ohne Förderung	3,58	-	-	-	4,37
Förderquote: 40%	3,58	-	-	-	4,10
Förderquote: 80%	3,58	-	-	-	3,91

Tabelle 17: Batteriebusse mit Ladung am Rendezvous-Platz - Standardladung inkl. Förderung - Annuitäten in Euro pro Nutzkilometer

Förderquote	Dieselreferenz	250 kWh 300 kW EIHe	250 kWh 300 kW HyHe	350 kWh 300 kW EIHe	350 kWh 300 kW EIHe	250 kWh 450 kW EIHe	250 kWh 450 kW HyHe	350 kWh 450 kW EIHe	350 kWh 450 kW EIHe
Ohne Förderung	3,58	4,39	4,39	4,48	4,47	4,50	4,49	4,58	4,49
Förderquote: 40%	3,58	4,14	4,13	4,18	4,17	4,21	4,21	4,25	4,18
Förderquote: 80%	3,58	4,00	3,99	3,99	3,98	4,07	4,06	4,06	4,01

Tabelle 18: Batteriebusse mit Ladung am Rendezvousplatz - Schnellladung inkl. Förderung - Annuitäten in Euro pro Nutzkilometer

### 4.1.4 Wirtschaftlichkeitsrechnung Brennstoffzellenbusse

Abschließend werden nun die Ergebnisse zur Wirtschaftlichkeit der Brennstoffzellenfahrzeuge diskutiert. In Abbildung 42 sind die TCO der beiden Brennstoffzellenkonzepte dargestellt. Im Vergleich zum Betrieb mit Dieselbussen werden hier hohe Mehrkosten notwendig. Die zusätzlichen Kosten pro Nutzkilometer betragen für den Batteriebus mit Brennstoffzellen-Range-Extender 1,11 €/km und für den Brennstoffzellenhybridbus 1,45 €/km.

Weiterhin sind Konzepte mit Brennstoffzellenfahrzeugen kostenintensiver als Batteriebuskonzepte. Dies liegt in den hohen Energiekosten des „grünen“ Wasserstoffs begründet. Der Elektrolyseprozess, bei dem aus Strom und Wasser Wasserstoff gewonnen wird, sowie die Wiederverstromung des Wasserstoffs innerhalb der Brennstoffzelle, sind sehr energieintensiv. Aufgrund dessen müssen Fahrzeuge mit Brennstoffzelle im Vergleich zu Batteriebussen ca. die zwei- bis dreifache Menge an elektrischer Energie pro Kilometer aufwenden. Die Kostenunterschiede zu dem günstigsten Elektrifizierungskonzept mit Batteriebussen betragen somit 32 ct/km (BZ-RE) bzw. 66 ct/km (BZ-Hybrid). Erst bei einer Halbierung der Wasserstoffkosten auf ca. 5 €/kg sind Konzepte mit Brennstoffzellenfahrzeugen auf vergleichbarem Niveau mit den Batteriebuskonzepten. Solche Kosten sind jedoch realistischerweise nicht mit „grünem“, sondern nur mit „grauem“ Wasserstoff realisierbar. Durch die Nutzung des „grauen“ Wasserstoffs würde sich jedoch die CO<sub>2</sub>-Bilanz deutlich verschlechtern und wäre auf ähnlichem Niveau mit den CO<sub>2</sub>-Emissionen, die durch eine Verbrennung des fossilen Energieträgers hervorgerufen werden.

Der Kostenunterschied zwischen den beiden betrachteten Brennstoffzellenkonzepten ist ebenfalls durch die Energiekosten begründet. Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender nutzen Energie, die direkt in die Batterie geladen wurde. Der Wasserstoffverbrauch kann somit reduziert werden, wodurch ebenfalls die Kosten gesenkt werden können.

Szenario Abstellhalle - Annuitäten (€ pro Nutzkilometer)  
 Betrieb mit Solobus - Nutzkilometer pro Jahr: 495.392 km

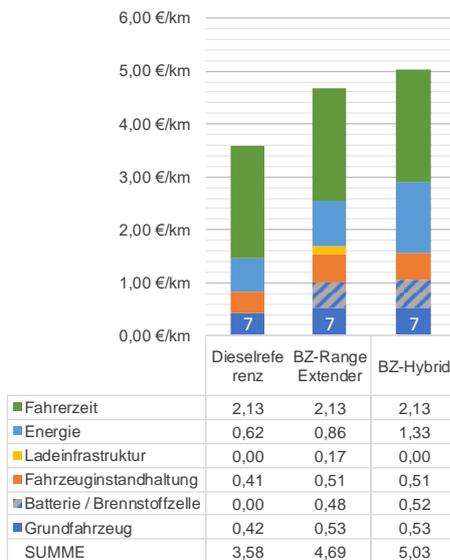


Abbildung 42: Brennstoffzellenbusse - Annuitäten in Euro pro Nutzkilometer (ohne Förderung)

Förderquote	Dieseleferenz	BZ-RE	BZ-Hybrid
Ohne Förderung	3,58	4,69	5,03
Förderquote: 40%	3,58	4,44	4,84
Förderquote: 80%	3,58	4,25	4,65

Tabelle 19: Brennstoffzellenbusse inkl. Förderung - Annuitäten in Euro pro Nutzkilometer

#### 4.1.5 Zwischenfazit

Als Fazit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in AP 3 ist festzuhalten, dass der Betrieb mit Elektrobussen, sowohl für Batterie- als auch für Brennstoffzellenbusse, kostenintensiver ist als der Betrieb mit Dieselbussen, auch bei Ausschöpfung möglicher Förderungen. Die relativen Mehrkosten belaufen sich je nach Elektrifizierungskonzept auf ca. 10 Prozent bis 40 Prozent.

Vergleicht man dahingehend die Mehrkosten für den Einsatz von Elektrobussen untereinander, ist zu erkennen, dass diese zwischen den Konzepten deutlich variieren. Es zeigte sich, dass der Betrieb mit Batteriebusen im Vergleich zu Fahrzeugen mit Brennstoffzelle kosteneffizienter ist. Die Kostenunterschiede sind dabei durch die hohen Energiekosten des Wasserstoffs begründet. In der Studie wurde der Einsatz von „grünem“ Wasserstoff unterstellt, welcher zu einem Preis von 10 €/kg bezogen wird. Jedoch sind die Konzepte mit Brennstoffzellenbussen erst bei einer Halbierung der Wasserstoffkosten auf ca. 5 €/kg auf einem vergleichbaren Niveau mit den Batteriebuskonzepten.

Durch den Vergleich der Batteriebuskonzepte untereinander lassen sich drei wesentliche Aspekte festhalten. Zum einen sind Konzepte, an denen an der Abstellhalle nachgeladen wird, kostenintensiver als die Konzepte, bei denen die Nachladung am *Rendezvous-Platz* erfolgt.

Trotz der Einsparung von Ladeinfrastruktur am *Rendezvous-Platz* werden zusätzliche Dienste notwendig, welche die Kosten für das Szenario mit Nachladung an der Abstellhalle erhöhen.

Weiterhin hat die Wirtschaftlichkeitsanalyse gezeigt, dass Konzepte mit Standardladung kostengünstiger sind als Konzepte mit Schnellladung. Für den Einsatz von Schnellladung können in den meisten Fällen keine Fahrzeuge bzw. keine Dienste eingespart werden. Dem gegenüber stehen jedoch hohe Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur, was zu höheren Lebenszykluskosten gegenüber Konzepten mit Standardladung führt.

Ein weiterer Aspekt ist der Vergleich der Heizungskonzepte. Obwohl in vielen Konfigurationen zwischen vollelektrischer Heizung und Hybridheizung keine Fahrzeuge eingespart werden können, sind Konzepte mit Hybridheizung günstiger. Durch den geringen elektrischen Energieverbrauch, der bei Hybridheizungskonzepten aus den Batteriesystemen bezogen wird, kann der Energiedurchsatz durch die Batterie reduziert werden. Hierdurch wird das Lebensdauerende (Anzahl der äquivalenten Vollzyklen; siehe Kapitel 1.2 und 4.1.1.2) verzögert, und entsprechend müssen Ersatzbatterien erst zu einem späteren Zeitpunkt beschafft werden. Da in der Kostenrechnung ebenfalls die Restwerte der Batteriesysteme berücksichtigt wurden, sind die Kosten der Fahrzeugkonzepte mit Hybridheizung günstiger.

## 4.2 Umweltauswirkungen

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

### 4.2.1 Annahmen für die Emissionsrechnung

Die Emissionen eines Busbetriebs können in global und lokal wirksame Emissionen aufgeschlüsselt werden. Als global wirksame Emissionen sind insbesondere Treibhausgasemissionen (CO<sub>2</sub>) zu nennen, welche zum einen während des Betriebs und zum anderen bei der Energieträgerbereitstellung emittiert werden. Als lokal wirksame Emissionen sind Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Feinstaub (Particulate Matter, PM) von Relevanz, die aus der Verbrennung von Kraftstoff resultieren<sup>6</sup>. Als Referenz für die Bewertung der Umweltauswirkungen wurde der Betrieb von Dieselnissen mit EURO VI Norm herangezogen.

---

<sup>6</sup> Feinstaub-Emissionen entstehen auch durch Bremsabrieb und Aufwirbelung von Straßenstaub. Jedoch werden diese Faktoren nicht betrachtet, da sie schwer zu quantifizieren und zu vermeiden sind und i.d.R. höhere Partikelgrößen aufweisen (weniger lungengängig). Elektrobusse hätten im Vergleich leichte Vorteile, da sie durch die Möglichkeit des regenerativen Bremsens einen geringeren Bremsverschleiß aufweisen.

In Tabelle 20 sind die durchschnittlichen (globalen und lokalen) Emissionen von Diesel- und Elektrobussen pro Kilometer aufgeführt. Die Werte basieren auf dem „Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ sowie auf einer Veröffentlichung des Umweltbundesamts [13]. Die Emissionen des Kraftstoffzusatzheizers sind in den Werten nicht enthalten. Wie in AP 1 beschrieben werden Elektrobusse mit emissionsneutralem Strom betrieben, so dass durch den Betrieb keine Emissionen anfallen.

	Dieseleferenz	Batteriebusse	Brennstoffzellenbusse
CO <sub>2</sub> -Emissionen	1,24 kg/km	0 kg/km	0 kg/km
NO <sub>x</sub> -Emissionen	0,35 g/km	0 g/km	0 g/km
PM-Emissionen	0,02 g/km	0 g/km	0 g/km

Tabelle 20: Faktoren für global wirksames CO<sub>2</sub> und lokal wirksamen NO<sub>x</sub> und PM-Emissionen

Der Einsatz des Kraftstoffzusatzheizers bei einer Hybridheizung führt bei den Batteriebusen durch die Verbrennung von Kraftstoff zu globalen und lokalen Emissionen. Der Kraftstoffzusatzheizer wird in der Regel jedoch erst bei Temperaturen unter 4 °C stufenweise zugeschaltet. Bei Temperaturen über 4 °C steht hingegen die elektrisch versorgte Wärmepumpe zum Heizen des Fahrgastraums zur Verfügung. In Abbildung 43 ist das Temperaturprofil der Stadt St. Ingbert zwischen 5:00 Uhr und 24:00 Uhr dargestellt, welches für die Berechnung der Emissionen der Hybridheizung herangezogen wurde. Für die Emissionsberechnung wurde die Annahme getroffen, dass der Kraftstoffzusatzheizer mit Diesel betrieben wird. Die NO<sub>x</sub>-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 [14]. Die Ausstoßmengen von rund 2,97 kg CO<sub>2</sub> pro Liter Diesel leiten sich aus den Annahmen für die global wirksamen Emissionen der Dieselverbrennung inkl. Bereitstellung ab.

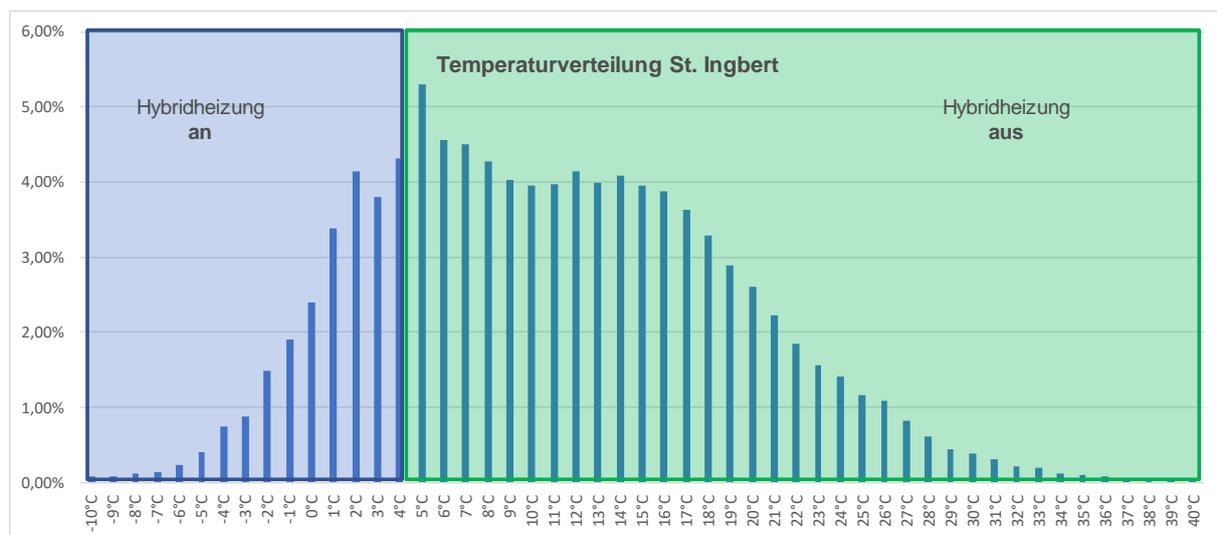


Abbildung 43: Temperaturprofil der Stadt St. Ingbert zwischen 5:00 Uhr und 24:00 Uhr

### 4.2.2 Ergebnisse

Mit den oben beschriebenen Annahmen und den Einsatzszenarien, die in AP 2 ermittelt wurden, wurden die Emissionen der Fahrzeugkonzepte berechnet. Exemplarisch sind die Ergebnisse für das Szenario, an dem an der Abstellhalle nachgeladen wird; dargestellt in Abbildung 44. Die Schlussfolgerungen der Umweltauswirkungen lassen sich ebenfalls für das Szenario, an dem am *Rendezvous-Platz* nachgeladen wird, übertragen.

Über alle Fahrzeugkonfigurationen hinweg lässt sich festhalten, dass durch den Einsatz von Batteriebusen mit vollelektrischer Heizung sowie von Brennstoffzellenbussen, im Vergleich zur Dieselreferenz, 100 Prozent der Schadstoffemissionen vermieden werden können. Wie in AP 1 beschrieben werden Elektrobusse mit emissionsneutralem Strom betrieben, so dass durch den Betrieb keine Emissionen anfallen. Durch die Konzepte, in denen eine Hybridheizung zum Einsatz kommt, werden ebenfalls Emissionen reduziert, jedoch entstehen durch die Dieselerbrennung weiterhin Schadstoffe. Allerdings sind insbesondere die CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen minimal, weshalb eine Schadstoffreduktion um 95 Prozent möglich ist. Die Feinstaub-Emissionen (PM) können im Vergleich zum Dieselbusbetrieb ebenfalls um ca. 80 Prozent reduziert werden. Wie aus der Wirtschaftlichkeitsrechnung deutlich geworden ist, ist ein vollständig emissionsfreier Betrieb allerdings mit einem Mehraufwand an Kosten verbunden.

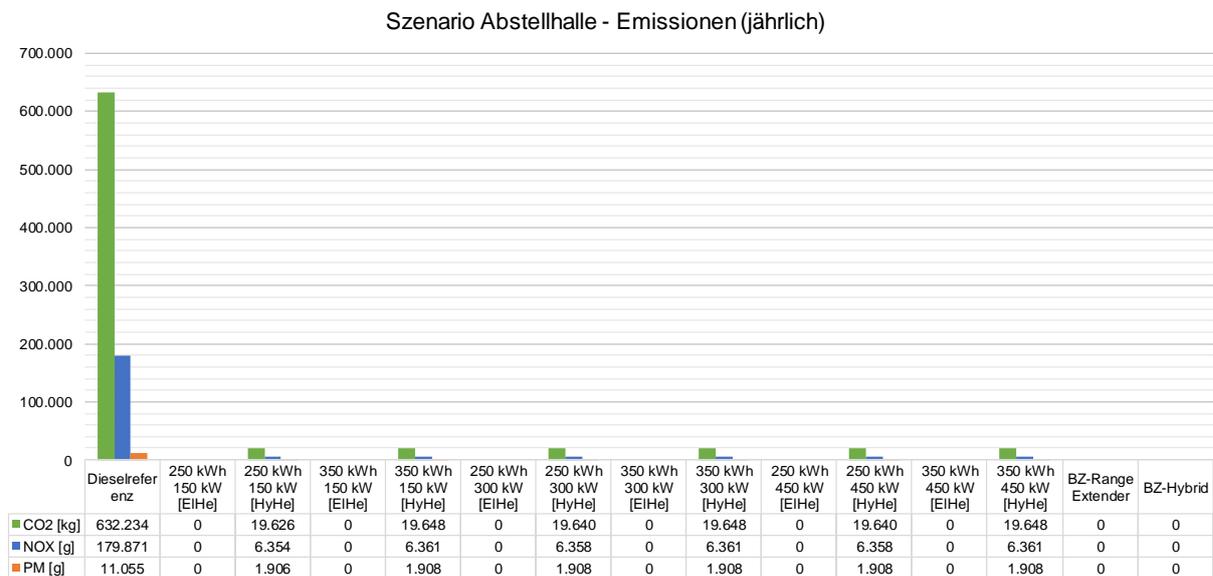


Abbildung 44: Jährliche Emissionen aller betrachteten Fahrzeugkonzepte für das Szenario Abstellhalle

## 5. Umstellungskonzept (AP 4)

In AP 4 wurden auf Basis der Ergebnisse aus AP 2 und AP 3 eine Umstellung des Stadtbussystems INGO auf Elektrobussysteme erarbeitet. Die hierbei verwendete Methodik sowie die Kriterien sind in Kapitel 5.1 erläutert. In Kapitel 5.2 werden allgemeine Technologieempfehlungen hergeleitet, welche sich aus Erkenntnissen der einzelnen Arbeitspaketen ergeben. In Kapitel 5.3 wird ein konkretes Umstellungskonzept dargelegt. Abschließend werden in 5.4 die Elektrifizierungsmöglichkeiten der Gewerbebuslinien im Kontext der Ergebnisse der INGO-Linien diskutiert.

### 5.1 Methodik und Kriterien

Im Rahmen der technischen und betrieblichen Analyse und der nachgelagerten TCO-Betrachtung wurden vielversprechende technische Lösungen identifiziert und hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und ihres Umweltnutzens bewertet. Die Minimierung der Lebenszykluskosten sowie der betrieblichen Anpassungen waren dabei die wesentlichen Kriterien. Weiterhin wurden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Umstellung der INGO-Linien soll gebündelt 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 Elektrobusskonzepte berücksichtigt werden
- Umstellung soll kosteneffizient und unter Berücksichtigung aktueller Förderprogramme erfolgen

Neben den generellen Aspekten wurden bei der Erstellung des Umstellungskonzeptes die spezifischen Anforderungen für St. Ingbert berücksichtigt. Eine wesentliche Herausforderung ist der Einfluss der Ladefenster auf die Dienstplanung sowie auf die betrieblichen Anpassungen (s. Kapitel 3.5). Ziel der Betrachtung war es, dass die Dienstplanung soweit wie möglich erhalten bleiben kann und die Anpassungen minimiert werden.

## 5.2 Technologieempfehlung

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

Beziehend auf die Dieselreferenz kann eine Umstellung mittels Brennstoffzellenbussen im Vergleich zu Batteriebusen ohne betriebliche Anpassungen und ohne Fahrzeugmehrbedarf durchgeführt werden. Weiterhin wird hierbei kein fossiler Zusatzheizer eingesetzt, so dass die Emissionen gegenüber dem Betrieb mit Dieselsebussen vollständig eingespart werden können. Diesen Vorteilen stehen allerdings eine geringe Kosteneffizienz und Marktreife gegenüber. Aufgrund dessen können trotz der betrieblichen Vorteile im Vergleich zum Batteriebusbetrieb, die wirtschaftlichen Nachteile nicht aufgewogen werden. Eine Elektrifizierung mittels Brennstoffzellenhybridbussen wird daher nicht empfohlen.

Batteriebuskonzepte mit Nachladung an der Abstellhalle bieten den Vorteil, dass keine Ladeinfrastruktur am *Rendezvous-Platz* errichtet und dieser entsprechend nicht verändert werden muss. Die zum Betrieb benötigten Ladefenster und Ladephasen erfordern jedoch Leerfahrten in die *Sophie-Krämer-Straße*, wodurch die Dienstplanung nicht in ihrer aktuellen Form beibehalten werden kann. Es werden zusätzliche Dienste und somit auch zusätzliche Fahrer notwendig. Dies hat zur Folge, dass die Kosten ansteigen. Der Vergleich in Arbeitspaket 3 zwischen der Option, bei der nur an der Abstellhalle nachgeladen wird und den Optionen, bei denen die Nachladung untertägig am *Rendezvous-Platz* erfolgt, hat gezeigt, dass die Umstellung mit Nachladung an der Abstellhalle aufgrund der zusätzlichen Dienste kostenintensiver ist. Die anfallenden Kosten können nicht durch die geringeren Investitionen in die benötigte Ladeinfrastruktur kompensiert werden. Eine Elektrifizierung mittels Batteriebusen und anschließlicher Nachladung an der Abstellhalle wird daher ebenfalls nicht empfohlen.

Der Vergleich zwischen Konzepten mit Standard- und Konzepten mit Schnellladung am *Rendezvous-Platz* hat gezeigt, dass durch den Einsatz eines 450 kW Schnellladesystems der Fahrzeugbedarf gesenkt und die betrieblichen Anpassungen minimiert werden können. Dem gegenüber stehen jedoch erhöhte Kosten – hervorgerufen durch die leistungsfähigere Ladeinfrastruktur, erhöhte bauliche Maßnahmen und die Errichtung von Lademasten – sowie eine geringere Marktverfügbarkeit von schnellladefähigen Fahrzeugen mit hohen Batteriekapazitäten. Somit ist eine Umstellung mittels Standardladung vorteilhafter.

Die Emissionen des Batteriebusseinsatzes werden von dem verwendeten Heizkonzept bestimmt, wodurch sich ein unterschiedliches Emissionsreduktionspotential ergibt. 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. Darüber hinaus können aufgrund der begrenzten Einsatzdauer im Jahr Batteriebusse mit Hybridheizung dennoch signifikante Emissionseinsparungen von über 95 Prozent CO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> sowie über 75 Prozent PM gegenüber dem Dieselbusbetrieb erzielen.

Das Batteriebuskonzept mit Hybridheizung und Standardladung am *Rendezvous-Platz* bietet somit für das Stadtbussystem INGO einen guten Kompromiss zwischen betrieblichen Anpassungen, Kosteneffizienz und Umweltnutzen. Das Marktangebot an geeigneten Fahrzeugen ist stetig steigend und erste Einsätze in größeren Flotten stellen die Praxistauglichkeit unter Beweis.

### 5.3 Umstellungskonzept

Die Analyse der unterschiedlichen Fahrzeugkonzepte hat ergeben, dass eine Lösung mittels Batteriebusen und Standardladung am *Rendezvous-Platz* die sinnvollste Elektrifizierungsmöglichkeit für die Umstellung der INGO-Linien ist. Im Folgenden werden die konkrete Fahrzeugkonfiguration, die notwendigen Kosten sowie weitere Vor- und Nachteile dieser Lösung diskutiert.

#### 5.3.1 Fahrzeugkonzept

Das Fahrzeugkonzept der Umstellung sieht vor, dass Batteriebusse des Typs 3 mit 150 kW Steckerladung sowie Hybridheizung eingesetzt werden sollen. Die technische und betriebliche Analyse in AP 2 hat gezeigt, dass alternative Konzepte mit Standardladung am *Rendezvous-Platz* technisch nicht möglich sind (siehe Kapitel 3.2.2). Für das empfohlene Konzept werden acht Batteriebusse benötigt, und die Fahrzeugtausche werden entsprechend direkt am *Rendezvous-Platz* durchgeführt. In Abbildung 32 (AP 2) ist das entsprechende Betriebsmodell aufgezeigt.

Bei diesem Umstellungskonzept muss sowohl an der Abstellhalle als auch am *Rendezvous-Platz* Ladeinfrastruktur errichtet werden. Hierzu werden vier Ladegeräte an der Abstellhalle sowie zwei Ladestationen mit 150 kW Ladeleistung am *Rendezvous-Platz* benötigt. Die Ladegeräte für die Abstellhalle sind so auszulegen, dass jeweils ein Ladegerät zwei Fahrzeuge laden. Die Ladeinfrastruktur am *Rendezvous-Platz* würde gemäß Kapitel 2.4, an der Rückwand der Postfiliale errichtet werden. In diesem Areal müssen Stromversorgungsinfrastruktur (Transformator, Netztechnik, etc.) sowie die Ladegeräte inkl. Steckerverbindung gemäß Abbildung 22 aufgestellt werden. kann.

### 5.3.2 Anfangsinvestitionen und Betriebskosten

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in AP 3 hat gezeigt, dass die Umstellung auf Elektrobusse, im Vergleich zum Dieselbusbetrieb, zusätzliche Kosten verursacht. Die Investitionskosten des Umstellungskonzepts sind in Tabelle 21 dargestellt. Die Gesamtinvestitionskosten betragen (ohne Berücksichtigung einer Förderung) ca. 5,9 Mio. €. Durch die unterschiedlichen Förderprogramme können wiederum 1,4 Mio. € bzw. 2,4 Mio. € eingespart werden, so dass der Eigenanteil gesenkt werden kann.

	Umfang	Investitionskosten Dieselreferenz	Investitionskosten Batteriebusse
Fahrzeugbeschaffung	7x Solobusse (Diesel) / 8x Solobusse (Batterie)	2.100.000 €	4.900.000 €
Ladeinfrastruktur Abstell- halle	4 Ladegeräte à 150 kW, Netzan- schluss, Stromversorgungsinfrastruk- tur	-	600.000 €
Ladeinfrastruktur Rendez- vous-Platz	2 Ladegeräte à 150 kW, Netzan- schluss, Stromversorgungsinfrastruk- tur	-	405.000 €
<b>Summe (ohne Förderung)</b>		<b>2.100.000 €</b>	<b>5.905.000 €</b>
<b>Mögliche Förderung bei Förderquote 40%</b>		-	1.402.000 €
<b>Mögliche Förderung bei Förderquote 80%</b>		-	2.402.000 €

Tabelle 21: Anfangsinvestitionskosten Umstellungskonzept

Neben den Anfangsinvestitionskosten gilt es auch die laufenden Kosten zu berücksichtigen, was im Rahmen der Studie anhand der TCO erfolgte. Die Lebenszykluskosten für dieses Konzept betragen ohne Förderung 4,37 €/km. Das vorgestellte Konzept ist die kostengünstigste Elektrifizierungslösung aller in dieser Studie betrachteten Elektrobuskonzepte. Durch die Einsparung der zusätzlichen Dienste sowie die kostengünstige Standardladeinfrastruktur können die Lebenszykluskosten minimiert werden. Sofern auf etwaige Förderprogramme zurückgegriffen werden kann, sinken die Annuitäten pro Nutzkilometer auf 4,10 €/km (Förderquote 40 Prozent) bzw. 3,91 €/km (Förderquote 80 Prozent). Dem gegenüber stehen die Lebenszykluskosten für den Dieselbusbetrieb von 3,58 €/km. Die geringeren Betriebskosten der Batteriebusse können die höheren Anfangsinvestitionskosten, unter Zuhilfenahme der Förderung weitgehend kompensieren. Bei einer jährlichen Fahrleistung von ca. 500.000 km belaufen sich die jährlichen Mehrkosten gegenüber der Dieselreferenz auf einen Wert zwischen 160.000 € und 390.000 €.

### 5.3.3 Diskussion

Das vorgestellte Umstellungskonzept beschreibt eine Elektrifizierung mittels Batteriebussen und untertägiger Standardladung am *Rendezvous-Platz*. Der Vorteil dieses Konzepts sind die Ersparnisse der zusätzlichen Dienste. Dies hat zur direkten Folge, dass keine zusätzlichen Fahrer benötigt werden, und die Arbeitszeiten der aktuellen Dienstplanung aufrechterhalten wer-

den können. Insgesamt beschreibt das Umstellungskonzept die kostengünstigste Elektrifizierungslösung aller in der Studie betrachteten Konfigurationen. Des Weiteren sind Busse mit einer Batteriekapazität von 350 kWh sowie Ladegeräte mit einer Ausgangsladeleistung von 150 kW sind auf dem Elektrobustmarkt weit verbreitet und es findet sich eine Vielzahl an Anbietern. Darüber hinaus können im Vergleich zur Dieselreferenz große Mengen an Schadstoffemissionen eingespart werden. Mittels dieser Umstellung können ca. 600 T CO<sub>2</sub>, 170 kg NO<sub>x</sub> sowie 8 kg Feinstaub eingespart werden.

Der Nachteil dieser Lösung jedoch ist, dass am *Rendezvous-Platz* Ladeinfrastruktur errichtet werden muss. Zu diesem Zweck müssen bauliche Maßnahmen ergriffen werden, was eine Umgestaltung des *Rendezvous-Platzes* zur Folge hat. Ein weiterer Nachteil ist, dass, obwohl zusätzliche Dienste eingespart werden, vermehrt Fahrzeugtausche zwischen den Linienfahrten durchgeführt werden müssen. Diese Anforderung führt zu betrieblichen Einschränkungen, da bspw. Verspätungen erschwerter ausgeglichen werden können.

### 5.3.4 Zeitliche Planung

Aktuell ist die Fahrleistung der INGO-Linien durch die Stadt St. Ingbert bis Mitte 2021 an *Saar-Mobil* vergeben. Zu diesem Zeitpunkt muss die Fahrleistung neu ausgeschrieben und vergeben werden. Angesichts der Zeitaufwände für die Akquirierung von Fördermitteln, den Ausschreibungsprozess sowie die Lieferzeiten der Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur ist die Umsetzung bis Mitte 2021 für den potentiellen Betreiber relativ anspruchsvoll. **Die genannten Prozesse können mehrere Jahre dauern. Es empfiehlt sich darum, dass die Ausschreibung der Stadt St. Ingbert so gestaltet ist, dass zunächst (für bspw. 2 Jahre) der Liniendienst der INGO-Linien weiterhin mit Dieselnissen erbracht werden darf. Danach könnte die Fahrleistung vollständig durch Elektrobussysteme erbracht werden. Dies gibt dem Betreiber genügend Zeit das Konzept inkl. etwaiger Förderungen und kosteneffizient umzusetzen.**

## 5.4 Elektrifizierung Gewerbebuslinien

Auf Basis der Ergebnisse der INGO-Linien werden im Folgenden die Elektrifizierungsmöglichkeiten der Gewerbebuslinien diskutiert. Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, wurden zur Erschließung der Gewerbegebiete drei zusätzliche Linien identifiziert, die jeweils hauptsächlich morgens, mittags und abends vereinzelt Linienfahrten durchführen.

### 5.4.1 Fahrzeugkonzept

In dem vorgestellten Umstellungskonzept der INGO-Linien wurden Batteriebusse mit 350 kWh Batteriekapazität und Hybridheizung empfohlen. Sofern eine solche Fahrzeugkonfiguration auch auf den Gewerbebuslinien eingesetzt würde, könnten diese Linien mit 3 Bussen

elektrifiziert werden. Aufgrund der geringen Fahrleistungen sind dabei keine untertägigen Ladephasen notwendig. Da sich die Einsatzzeiten der Gewerbebuslinien und der INGO-Linien überschneiden, kann der Fahrzeugbedarf bei einer Verknüpfung der Fahrleistungen nicht reduziert werden, so dass in diesem Fall 11 Busse (3x Gewerbebus, 8x INGO) benötigt würden.

Damit die Gewerbebuslinien jedoch sinnvoll elektrifiziert werden sowie um den größtmöglichen Umweltvorteil zu erzielen, muss die Fahrleistung der Elektrobusse entsprechend hoch sein. Eine Nutzung der Fahrzeuge ausschließlich auf den Gewerbebuslinien ist nicht sinnvoll, da die Kilometerlaufleistung (Jahresfahrleistung ca. 77.000 km) beschränkt und somit die Auslastung der Fahrzeuge gering ist. Sofern eine Elektrifizierung der Gewerbebuslinien angestrebt wird, sollten zusätzliche Fahrleistungen (bspw. Kurzläufer, Schulverkehr, etc.) in die Umlaufpläne der Elektrobusse integriert werden.

#### 5.4.2 Anfangsinvestitionen und Betriebskosten

Die Anfangsinvestitionskosten der Gewerbebuslinie werden in Tabelle 22 dargestellt. Die für den Betrieb notwendige Ladeinfrastruktur ist hierbei abhängig vom Einsatzkonzept der Fahrzeuge. Sofern die Fahrzeuge ausschließlich auf den Gewerbebuslinien eingesetzt werden würden, kann durch ein intelligentes Lademanagementsystem die Ladeinfrastruktur der INGO-Linien genutzt werden, so dass keine zusätzlichen Ladegeräte benötigt werden. Sofern die Auslastung der Fahrzeuge erhöht wird, werden zusätzliche Ladephasen notwendig. Unter der Annahme, dass die Fahrzeuge ähnliche Fahrleistungen haben, wie die Fahrzeuge, die auf den INGO-Linien eingesetzt werden, müssen zwei Standardladegeräte mit einer Ausgangsladeleistung von 150 kW zusätzlich beschafft werden. Die Gesamtinvestitionskosten würden in diesem Fall ohne Berücksichtigung einer Förderung ca. 2,1 Mio. € betragen. Durch die unterschiedlichen Förderprogramme können wiederum 0,5 Mio. € bzw. 0,87 Mio. € eingespart werden.

	Umfang	Investitionskosten Dieselreferenz	Investitionskosten Batteriebusse
Fahrzeugbeschaffung	3x Solobusse (Diesel) / 3x Solobusse (Batterie)	900.000 €	1.837.500 €
Ladeinfrastruktur	2 Ladegeräte à 150 kW, Netzan- schluss, Stromversorgungsinfrastruk- tur	-	300.000 €
<b>Summe (ohne Förderung)</b>		900.000 €	2.137.500 €
<b>Mögliche Förderung bei Förderquote 40%</b>		-	495.000 €
<b>Mögliche Förderung bei Förderquote 80%</b>		-	870.000 €

Tabelle 22: Anfangsinvestitionskosten Gewerbebuslinie

Die Quantifizierung der Lebenszykluskosten ist ohne Definition der zusätzlichen Fahrleistung nur begrenzt möglich. Bei einer vergleichbaren Auslastung wie für die Fahrzeuge der INGO-Linien, können ähnliche Lebenszykluskosten angenommen werden (vgl. Kapitel 5.3.2). Bei einer jährlichen Fahrleistung der Gewerbebuslinien von ca. 77.000 km ergeben sich somit je

nach Förderung Mehrkosten zwischen ca. 25.000 € (Förderquote 80 %) und 60.000 € (keine Förderung) pro Jahr gegenüber einem reinen Dieselbusbetrieb.

### 5.4.3 Umweltauswirkungen

Die Elektrifizierung der Gewerbebuslinien hat ebenfalls positive Auswirkungen auf die Schadstoffemissionen des Betriebs. Nur durch den Einsatz der Hybridheizung werden Schadstoffe im Betrieb emittiert, so dass große Mengen im Vergleich zum Dieselbusbetrieb eingespart werden können. Bei einer jährlichen Laufleistung von ca. 77.000 km auf den Gewerbebuslinien können ca. 95 t CO<sub>2</sub>, 26 kg NO<sub>x</sub> sowie ca. 1,5 kg Feinstaubemissionen eingespart werden.

### 6. Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen der Studie wurde die Elektrifizierung des Stadtbussystems INGO mit Batteriebusen und Brennstoffzellenbussen untersucht. Hierbei wurden unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen, Ladekonzepte und Ladeorte sowie Klimatisierungskonzepte betrachtet. Für alle Varianten wurden angepasste Betriebskonzepte erstellt und hinsichtlich ihrer betrieblichen Konsequenzen, der resultierenden Total-Costs-of-Ownership (TCO) sowie ihrer Umweltauswirkungen bewertet.

Die technische und betriebliche Analyse hat gezeigt, dass eine Umstellung auf Elektrobusse grundsätzlich möglich ist. Für Elektrifizierungskonzepte mit Batteriebusen sind jedoch betriebliche Anpassungen notwendig, die zum einen zusätzliche Fahrzeuge beinhalten und zum anderen Veränderungen in der Dienstplanbildung nach sich ziehen. Bei einer untertägigen Nachladung ausschließlich an der Abstellhalle an der *Sophie-Krämer-Straße* werden zusätzliche Dienste und somit zusätzliche Fahrer notwendig. Elektrifizierungskonzepte mit Brennstoffzellenbussen bedürfen im Vergleich zum Dieselbusbetrieb keiner betrieblichen Anpassung, so dass der Betrieb in seiner jetzigen Form beibehalten werden könnte. Da jedoch der Aufbau einer Tankinfrastruktur für Wasserstoffbusse an der Abstellhalle nicht sinnvoll ist, muss die Nachtankung der Fahrzeuge an externer Stelle durchgeführt werden.

Im direkten Vergleich zur Dieselturbotechnologie führt die Umstellung auf Elektrobusse 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 entstehenden Mehrkosten nicht durch geringere operative Kosten kompensiert werden können. Auch unter Berücksichtigung möglicher Förderprogramme bleibt der Betrieb mit Dieselbussen die kostengünstigste Alternative. Im Vergleich der Elektrifizierungslösungen untereinander sind Konzepte mit Batteriebusen kostengünstiger als Konzepte mit Brennstoffzellenbussen.

Ein wesentlicher Vorteil der Elektrobuskonzepte ist die Reduzierung der Schadstoff- und Lärmemissionen. Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit vollelektrischer Heizung fahren lokal vollständig emissionsfrei. Batteriebusse mit Hybridheizung weisen, im Vergleich zum Dieseldieselbusbetrieb, ebenfalls hohe Einsparpotentiale auf.

Auf Basis der Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete wurden verschiedene Umstellungsalternativen erarbeitet und ein mögliches Umstellungskonzept abgeleitet. Batteriebusse mit 350 kWh Batteriegröße und Hybridheizung wurden im Rahmen der Studie als sinnvollstes Elektrifizierungskonzept identifiziert. Hierbei werden acht Batteriebusse benötigt. Die untertägige Nachladung der Fahrzeuge erfolgt mittels Standardladung am *Rendezvous-Platz*, so dass dort Ladeinfrastruktur errichtet werden muss. Für die nächtliche Nachladung muss ebenfalls Ladeinfrastruktur an der Abstellhalle errichtet werden.

### Referenzen

- [1] Technische Universität Berlin, „Elektrifizierung des Bus- und Wirtschaftsverkehrs,“ 2016.
- [2] Lüneburg Leuphana Universität, „Zukunft der elektrischen und der thermochemischen Speichertechnik in Bussen,“ 2013.
- [3] ZIEHL-ABEGG Automotive GmbH, „ZAwheel - Produktvorstellung,“ 2016.
- [4] F. Bergk, U. Lambrecht, R. Pütz und H. Landinger, „Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV,“ Heidelberg, Landshut, München, 2015.
- [5] ZeEUS, „eBus Report - An overview of electric buses in Europe,“ 2016.
- [6] N. Natesan, „Enabling Fuel Cell Bus Deployment: Technology from Linde,“ 2016.
- [7] e-mobil BW, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE,, „Wasserstoffinfrastruktur für eine nachhaltige Mobilität: Entwicklungsstand und Forschungsbedarf,“ 2013.
- [8] M. F. O. S. N. W. a. S. W. Benjamin Reuter, „New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots: High-Level Techno-Economic Project Summary Report, 2017.,“ 2017.
- [9] M. Faltenbacher, „NewBusFuel Results,“ London, 2016.
- [10] Regionalverkehr Ruhr-Lippe GmbH, 2017.
- [11] A. B. Verkehrsplanung, „Betriebliches MÖbilitätsmanagement Gewebegebiet Süd; Schlussbericht,“ 2016.
- [12] E. P. u. d. Rat, „Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge,“ 2019.
- [13] Umweltbundesamt, „Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs,“ 2019.
- [14] 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.

## A. Anhang

### A1 Umstellungsalternativen

Neben dem vorgestellten Umstellungskonzept in Kapitel 5.3 sind weitere Elektrifizierungslösungen für die INGO-Linien möglich. Im Zuge der Arbeitspakete 2 und 3 wurden insgesamt drei alternative Elektrifizierungslösungen identifiziert, die jedoch im Vergleich zum empfohlenen Umstellungskonzept nachteilig sind. Die erste Alternative beschreibt eine Umstellung mittels Batteriebussen und ausschließlicher Nachladung an der Abstellhalle. Darüber hinaus wurde eine Elektrifizierung mittels Batteriebussen und Schnellladesystemen am *Rendezvous-Platz* diskutiert. Abschließend wurde Umstellungsalternative 3 vorgestellt; eine Elektrifizierung mittels Brennstoffzellenbussen.

#### Umstellungsalternative 1 - Batteriebusse mit Nachladung an der Abstellhalle

Die erste Umstellungsalternative beschreibt eine Elektrifizierung mittels Batteriebussen. Die Fahrzeuge werden hierbei ausschließlich in der Abstellhalle an der *Sophie-Krämer-Straße* nachgeladen. Wie in AP 2 beschrieben müssen bei der Bewertung insbesondere die zusätzlichen Dienste, die für die Leerfahrten zur Abstellhalle zum Nachladen der Fahrzeuge benötigt werden, berücksichtigt werden.

#### Fahrzeugkonzept

Der Vergleich der einzelnen Batteriebuskonzepte zeigt (sofern ausschließlich an der Abstellhalle nachgeladen wird), dass Konzepte mit Standardladung und CCS-Stecker zu bevorzugen sind. Durch den Einsatz von Schnellladesystemen mit Pantographen können, wie in AP 2 beschrieben, keine großen betrieblichen Vorteile erzielt werden. Für dieses Szenario kann der Fahrzeugbedarf nicht gesenkt werden, und es werden darüber hinaus zusätzlichen Dienste notwendig; sowohl für Standard- als auch für Schnellladung. Durch die höheren Anfangsinvestitionen sind Schnellladesysteme jedoch kostenintensiver als Steckerlösungen. Aufgrund dessen werden Schnellladesysteme bei einer Umstellung mit ausschließlicher Nachladung an der Abstellhalle nicht empfohlen.

Die empfohlene Technologie für dieses Szenario wäre Batteriebus 3 mit Steckerladung und Hybridheizung. Beim Vergleich der Standardladerkonzepte erweist sich diese Konfiguration als die kostengünstigste Elektrifizierungslösung. Weiterhin wird für die Umsetzung dieses Konzepts im Vergleich zum Dieselsebusbetrieb nur ein zusätzliches Fahrzeug benötigt. Die alternativen Konzepte mit Stecker erfordern zwei zusätzliche Fahrzeuge. Die betrieblichen Anpassungen können in diesem Szenario somit minimiert werden. Das Betriebskonzept ist in Abbildung 31 in AP 2 gezeigt.

Neben dem Mehrbedarf eines Busses werden weiterhin zwei zusätzliche Fahrer bzw. Dienste notwendig. Hierbei ist es sinnvoll, je einen Fahrer (vormittags und nachmittags) dafür einzusetzen, die Fahrzeugtausche am *Rendezvous-Platz* durchzuführen und entsprechend die Fahrten zum Aufladen der Busse zu übernehmen. Dies hätte den Vorteil, dass die übrigen Fahrer die Dienste in ihrer aktuellen Form beibehalten und weiterhin ihre Pausen am *Rendezvous-Platz* durchführen können. Alternativ kann eine neue Dienstplanung erfolgen.

Zusätzlich zu den Fahrzeugen wird an der Abstellhalle Ladeinfrastruktur benötigt. Das Konzept sieht dabei vor, dass für je zwei Fahrzeuge ein 150 kW-Ladegerät eingesetzt wird, womit in Summe vier Ladegeräte benötigt werden. Die Ladegeräte sind so auszulegen, dass jeweils ein Ladegerät zwei Fahrzeuge laden kann.

### Anfangsinvestitionen und Betriebskosten

In Tabelle 23 sind die Anfangsinvestitionskosten der Umstellungsalternative 1 dargestellt. Für deren Umsetzung belaufen sich die Investitionskosten auf ca. 5,5 Mio. €. Hierunter fallen die Fahrzeugbeschaffung sowie die Errichtung der Ladeinfrastruktur inkl. aller notwendigen Anlagen. Sofern weiterhin die INGO-Fahrleistung mittels Dieselnissen erbracht werden würde, würden Investitionen in Höhe von 2,1 Mio. € entstehen. Durch mögliche Förderungen können Investitionskosten in Höhe von 1,24 Mio. € (Förderquote 40 Prozent) bzw. 2,24 Mio. € (Förderquote 80 Prozent) eingespart werden, so dass der Eigenanteil gesenkt werden kann.

	Umfang	Investitionskosten Dieselreferenz	Investitionskosten Batteriebusse
Fahrzeugbeschaffung	7x Solobusse (Diesel) / 8x Solobusse (Batterie)	2.100.000 €	4.900.000 €
Ladeinfrastruktur Abstell- halle	4 Ladegeräte à 150 kW, Netzan- schluss, Stromversorgungsinfrastruk- tur	-	600.000 €
<b>Summe (ohne Förderung)</b>		<b>2.100.000 €</b>	<b>5.500.000 €</b>
<b>Mögliche Förderung bei Förderquote 40%</b>		-	1.240.000 €
<b>Mögliche Förderung bei Förderquote 80%</b>		-	2.240.000 €

Tabelle 23: Anfangsinvestitionskosten Umstellungsalternative 1

Für die Elektrifizierung gemäß Umstellungsalternative 1 betragen die Annuitäten pro Nutzkilometer 4,58 €/km. Unter der Berücksichtigung der Förderungen können diese auf 4,34 €/km (Förderquote 40 Prozent) bzw. auf 4,15 €/km (Förderquote 80 Prozent) reduziert werden. Bei einer jährlichen Fahrleistung der INGO-Linien von ca. 500.000 km und Gesamtkosten von 1,5 Mio. € betragen die jährlichen Mehrkosten zwischen 280.000 € bis 500.000 €.

### Diskussion

Die vorgestellte Umstellungsalternative beschreibt eine Elektrifizierung mittels Batteriebusen und ausschließlicher Nachladung an der Abstellhalle. Der große Vorteil dieser Option ist,

dass nur an einem Ort Ladeinfrastruktur errichtet werden muss. Bauliche Maßnahmen wären lediglich an der *Sophie-Krämer-Straße* notwendig und der *Rendezvous-Platz* könnte in seiner jetzigen Form bestehen bleiben. Darüber hinaus bietet dieses Fahrzeugkonzept eine große Auswahl an Anbietern, sowohl für die Elektrobusse als auch für die Ladegeräte. Busse mit einer Batteriekapazität von 350 kWh sowie Ladegeräte mit einer Ausgangsladeleistung von 150 kW sind auf dem Elektrobustmarkt weit verbreitet und es findet sich eine Vielzahl an Anbietern.

Dem gegenüber stehen jedoch die zusätzlich erforderlichen Dienste und den damit einhergehenden zusätzlichen Kosten. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse in AP 3 hat gezeigt, dass Konzepte mit ausschließlicher Nachladung an der Abstellhalle um ca. 100.000 € bis 120.000 € pro Jahr kostenintensiver sind als Konzepte mit untertägiger Nachladung am *Rendezvous-Platz*. Des Weiteren steigt durch die zusätzlichen Tausche der Fahrzeuge in dieser Option die Komplexität der Dienstplanung an.

### Umstellungsalternative 2 – Batteriebusse mit Schnellladung am Rendezvous-Platz

Neben der Möglichkeit die Fahrzeuge mittels Standardladung am *Rendezvous-Platz* nachzuladen, besteht ebenfalls die Option, Schnellladesysteme einzusetzen. Während der Ladefenster kann eine höhere Energiemenge in die Fahrzeuge geladen werden, so dass sich die Nachladezeit verringert und die Fahrzeuge schneller wiedereingesetzt werden können. Die betrieblichen Anpassungen können hiermit minimiert werden.

#### Fahrzeugkonzept

Sofern am *Rendezvous-Platz* ein Ladekonzept mit Schnellladesystemen eingesetzt wird, empfiehlt sich hierbei der Batteriebus 3 mit Hybridheizung sowie einem Schnellladesystem mit 450 kW Ausgangsladeleistung. Obwohl die Wirtschaftlichkeitsrechnung gezeigt hat, dass diese Elektrifizierungslösung nicht das kostengünstigste Schnellladekonzept ist (siehe Abbildung 41), werden hierbei im Vergleich zum Dieselmotortrieb keine zusätzlichen Fahrzeuge benötigt. Weiterhin wird die Anzahl der Ladefenster auf ein Minimum reduziert. Diese beiden Aspekte führen dazu, dass in diesem Fahrzeugkonzept verglichen mit allen übrigen Batteriebuskonzepten, die betrieblichen Anpassungen am geringsten sind. Eine Betrachtung, die sich ausschließlich auf die Kosten bezieht, ist hierbei nicht sinnvoll, da kostengünstigere Schnellladekonzepte mehr Fahrzeuge benötigen und somit die betrieblichen Einschränkungen wieder steigen. Das Betriebskonzept ist in Abbildung 36 in AP 2 dargestellt.

In dieser Umstellungsalternative werden vier Ladegeräte mit 150 kW Ladeleistung an der Abstellhalle und zwei Ladegeräte mit 450 kW Ladeleistung am *Rendezvous-Platz* benötigt. Neben den Ladegeräten selbst bedarf es ebenfalls Lademasten mit den entsprechenden Ladehauben, ähnlich wie in Abbildung 27 skizziert. Für den rein technischen Betrieb ist die Errichtung von einer Schnellladestation ausreichend. Jedoch würde ein Ausfall einer Station zur Folge haben,

dass der Linienbetrieb nicht aufrechterhalten werden könnte. Die zweite Ladestation erhöht somit die Einsatzflexibilitäten und die Stabilität des Betriebs und ist darum zu empfehlen.

### Anfangsinvestitionen und Betriebskosten

In Tabelle 24 sind die Investitionskosten der zweiten Umstellungsalternative dargestellt. Aufgrund der hohen Ladeleistung werden zusätzliche Investitionen notwendig, die durch die Fahrzeugeinsparung nicht kompensiert werden können. Die Investitionskosten belaufen sich ohne eine Förderung auf ca. 6,1 Mio. €. Durch die Inanspruchnahme möglicher Förderprogramme können ca. 1,6 Mio. € bzw. ca. 2,5 Mio. € eingespart werden.

	Umfang	Investitionskosten Dieselreferenz	Investitionskosten Batteriebusse
Fahrzeugbeschaffung	7x Solobusse (Diesel) / 7x Solobusse (Batterie)	2.100.000 €	4.287.500 €
Ladeinfrastruktur Abstell- halle	4 Ladegeräte à 150 kW, Netzan- schluss, Stromversorgungsinfrastruk- tur	-	600.000 €
Ladeinfrastruktur Rendez- vous-Platz	2 Ladegeräte à 450 kW, Netzan- schluss, Stromversorgungsinfrastruk- tur	-	1.215.000 €
<b>Summe (ohne Förderung)</b>		<b>2.100.000 €</b>	<b>6.102.500 €</b>
<b>Mögliche Förderung bei Förderquote 40%</b>		-	1.601.000 €
<b>Mögliche Förderung bei Förderquote 80%</b>		-	2.476.000 €

Tabelle 24: Anfangsinvestitionskosten Umstellungsalternative 2

Die Lebenszykluskosten dieses Elektrifizierungskonzept belaufen sich auf 4,49 €/km. Durch die Einsparung der Dienste ist diese Alternative günstiger als Umstellungsalternative 1 jedoch aufgrund der höheren Anfangsinvestitionen kostenintensiver als das empfohlene Umstellungskonzept in 5.3. Bei einer Nutzung der Förderprogramme sinken die TCO auf 4,18 €/km (Förderquote 40 Prozent) bzw. 4,01 €/km (Förderquote 80 Prozent). Somit betragen die jährlichen Mehrkosten gegenüber dem Dieselbusbetrieb zwischen 210.000 € und 450.000 €.

### Diskussion

Die vorgestellte Umstellungsalternative 2 beschreibt eine Elektrifizierung mittels Batteriebusen und untertägiger Schnellladung am *Rendezvous-Platz*. Mit dieser Fahrzeugkonfiguration und dem dazugehörigen Ladekonzept werden im Vergleich zum Betrieb mit Dieselbussen keine zusätzlichen Fahrzeuge benötigt. Weiterhin wird durch die hohe Batteriekapazität sowie die hohe Ladeleistung die Reichweite maximiert, so dass die betrieblichen Anpassungen und die Anzahl der Ladefenster minimiert werden. Durch die Verminderung der Ladefenster können die Fahrzeugtausche ebenfalls auf ein Minimum reduziert werden.

Der Nachteil dieser Umstellungsalternative ist, dass große bauliche Maßnahmen am *Rendezvous-Platz* notwendig werden. Neben der vergrößerten Stromversorgungsinfrastruktur (es

werden im Vergleich zum Umstellungskonzept leistungsstärkere und entsprechend größere Transformatoren benötigt) müssen zusätzlich zu den Ladegeräten Lademasten mit Ladehäuben installiert werden. Das optische Erscheinungsbild des *Rendezvous-Platzes* wird hierbei stark beeinflusst. Weiterhin schränken Fahrzeugkonzepte mit hoher Ladeleistung und großer Batteriekapazität die Marktverfügbarkeit stark ein. In der Regel werden von Herstellern entweder hohe Batteriekapazitäten mit Standardladung oder geringere Batteriekapazitäten mit Schnellladung angeboten. Fahrzeuge mit großer Batteriekapazität, die mit hohen Ladeleistungen (> 450 kW) nachgeladen werden können, sind auf dem Elektrobustmarkt nur sehr begrenzt verfügbar.

### Umstellungsalternative 3 – Brennstoffzellenbusse

Abschließend wird noch eine Umstellungsalternative mit Brennstoffzellenfahrzeugen beschrieben. Die Fahrzeuge werden hierbei analog zum Dieselbus betrieben. Die Nachtankung des Wasserstoffs erfolgt an einer externen Tankstelle.

#### Fahrzeugkonzept

Die technische und betriebliche Analyse hat gezeigt, dass im Vergleich zum Dieselbusbetrieb sowohl für einen Betrieb mit Brennstoffzellenhybrid- als auch mit Batteriebusen mit Brennstoffzellen-Range-Extender, keine betrieblichen Anpassungen notwendig sind und auch kein Fahrzeugmehrbedarf entsteht. Ein Betrieb mit Range-Extender-Fahrzeugen ist kostengünstiger als der Betrieb mit Brennstoffzellenhybridbussen, da erstere mehr Traktionsenergie direkt aus dem Batteriesystem beziehen und darum nicht auf die energie- und somit kostenintensive Verstromung des Wasserstoffs zurückgreifen müssen. Nichtsdestotrotz wird für den Einsatz von Brennstoffzellenbussen ein Betrieb mit Brennstoffzellenhybridfahrzeugen empfohlen. Für Hybridfahrzeuge wird keine Ladeinfrastruktur benötigt, wodurch keine baulichen Maßnahmen notwendig sind; lediglich die Fahrzeuge müssen beschafft werden. Der wichtigste Aspekt ist jedoch die Marktverfügbarkeit der Brennstoffzellenkonzepte. Batteriebusse mit Brennstoffzellen-Range-Extender sind aktuell noch in der Entwicklung und nur als Prototypen verfügbar. Erst mit dem Markteintritt von *EvoBus* in 2022 ist voraussichtlich ein Fahrzeug dieses Konzeptes erhältlich. Brennstoffzellenhybridkonzepte werden aktuell serienreif bzw. seriennah vom Hersteller *Van Hool* vertrieben und sind entsprechend weiter in der Entwicklung und somit zuverlässiger im Betrieb.

#### Anfangsinvestitionen und Betriebskosten

Die Investitionskosten für die Umstellungsalternative 3 sind in Tabelle 25 dargestellt. Da hier lediglich die Fahrzeuge beschafft werden müssen, sind die Investitionen für diese Option am geringsten. Sie belaufen sich auf ca. 4,7 Mio. € für sieben Busse. Bei einer Förderquote auf die

Fahrzeugmehrkosten von 40 Prozent können ca. 1,04 Mio. €, bei einer Quote von 80 Prozent ca. 2,1 Mio. € eingespart werden.

	Umfang	Investitionskosten Dieselreferenz	Investitionskosten Batteriebusse
Fahrzeugbeschaffung	7x Solobusse (Diesel) / 7x Solobusse (BZ-Hybrid)	2.100.000 €	4.707.500 €
<b>Summe (ohne Förderung)</b>		<b>2.100.000 €</b>	<b>4.707.500 €</b>
<b>Mögliche Förderung bei Förderquote 40%</b>		-	1.043.000 €
<b>Mögliche Förderung bei Förderquote 80%</b>		-	2.086.000 €

Tabelle 25: Anfangsinvestitionskosten Umstellungsalternative 3

Die Wirtschaftlichkeitsrechnung in AP 3 hat gezeigt, dass Konzepte mit Brennstoffzellenbussen, trotz geringerer Anfangsinvestitionskosten, deutlich kostenintensiver sind als eine Elektrifizierung mittels Batteriebusen. Durch den Bezug des „grünen“ Wasserstoffs entstehen hohe operative Kosten. Die TCO für diese Umstellungsalternative betragen ohne eine finanzielle Förderung 5,03 €/km. Im Vergleich zum Umstellungskonzept liegt der Unterschied bei 0,66 €/km und zum Dieselbusbetrieb sogar bei 1,45 €/km. Es ergeben sich somit jährliche Mehrkosten von ca. 720.000 € bei einer jährlichen Laufleistung von ca. 500.000 km. Auch mit der Nutzung einer Förderung verbleiben gegenüber dem Diesel- oder Batteriebusbetrieb erhebliche Mehrkosten. Mit einer Förderung der Fahrzeugmehrkosten betragen die Lebenszykluskosten bei einer Förderquote von 40 Prozent 4,83 €/km und bei einer Förderquote von 80 Prozent 4,64 €/km. Die jährlichen Mehrkosten würden entsprechend 620.000 € bzw. 530.000 € betragen.

## Diskussion

In der letzten Umstellungsalternative wurde eine Elektrifizierung mit Brennstoffzellenhybridbussen beschrieben. Aufgrund der höheren Reichweite der Fahrzeuge kann der Liniendienst ohne betriebliche Anpassungen und analog zum Diesel weitergeführt werden. Die Fahrer können die Dienste in der gewohnten Form weiterführen und Fahrzeugtausche werden nicht notwendig. Weiterhin muss für diese Umstellungsalternative keine Infrastruktur errichtet werden, da die Fahrzeuge an einer externen Tankstelle nachgetankt werden. Ein weiterer Vorteil dieses Konzepts ist, dass der Betrieb vollständig emissionsfrei ist, da hierbei kein fossiler Zusatzheizer verwendet wird.

Der große Nachteil des Konzepts sind die hohen Energiekosten von „grünem“ Wasserstoff. Die daraus resultierenden Lebenszykluskosten sind um ca. 15 Prozent höher als beim Betrieb mit Batteriebusen und um ca. 40 Prozent höher als beim aktuellen Dieselbusbetrieb. Ein Betrieb mit Brennstoffzellenfahrzeugen ist aufgrund dessen mit erheblichen Mehrkosten verbunden. Weiterhin müssen die Fahrzeuge an einer externen Tankstelle nachgetankt werden. Da aktuell keine Wasserstofftankstelle in St. Ingbert bzw. in der direkten Umgebung vorhanden ist, muss die Errichtung einer solchen dementsprechend mit einem potentiellen Betreiber abgestimmt

und koordiniert werden. Hierdurch entstehen zusätzliche Aufwände. Darüber hinaus ist der Markt für Brennstoffzellenhybridbusse stark eingeschränkt und nur wenige Hersteller bieten serienreife bzw. seriennahe Fahrzeuge an.