

# Elektrobuseinsatz in Duisburg

---

Machbarkeitsstudie für das Bedienungsgebiet  
der Duisburger Verkehrsgesellschaft AG

## Abschlussbericht

Kunde: Duisburger Verkehrsgesellschaft AG  
Bungertstraße 27  
47053 Duisburg



Autoren: Sinhuber, Philipp  
Rogge, Matthias  
Sistig, Max

Datum: 13.03.2018



## Inhalt

|  |        |
|--|--------|
| Inhalt .....   | - 1 -  |
| <i>Executive Summary / Zusammenfassung</i> .....                 | - 2 -  |
| Studieninhalte .....   | - 8 -  |
| 1. Datengrundlage (Arbeitspaket 1) .....                         | - 9 -  |
| 1.1 Betriebsdaten .....  | - 9 -  |
| 1.2 Technische Grundlagen .....                                  | - 3 -  |
| 1.3 Ladeorte und Stromversorgung .....                           | - 7 -  |
| 1.4 Wasserstoffbereitstellung .....                              | - 11 - |
| 1.5 Betriebshof Am Unkelstein .....                              | - 13 - |
| 1.6 Kostenannahmen .....   | - 15 - |
| 1.7 Änderungen am Nahverkehrsplan seit Studiendurchführung ..... | - 21 - |
| 2. Technische und betriebliche Analyse (Arbeitspaket 2) .....    | - 23 - |
| 2.1 Methodik und Kriterien .....                                 | - 23 - |
| 2.2 Besonderheiten einzelner Linien .....                        | - 24 - |
| 2.3 Detaillierte Ergebnisse für Linie 934 .....                  | - 25 - |
| 2.4 Ergebnisübersicht und Diskussion .....                       | - 31 - |
| 3. Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkungen (Arbeitspaket 3) ..... | - 36 - |
| 3.1 Kostenrechnung und Bewertung .....                           | - 36 - |
| 3.2 Quantifizierung der Umweltwirkungen .....                    | - 37 - |
| 3.3 Detaillierte Ergebnisse für Linie 934 .....                  | - 40 - |
| 3.4 Ergebnisübersicht und Diskussion .....                       | - 45 - |
| 4. Umstellungskonzept (Arbeitspaket 4) .....                     | - 52 - |
| 4.1 Linienübergreifende Empfehlungen .....                       | - 52 - |
| 4.2 Reifegrad der Technik .....                                  | - 57 - |
| 4.3 Fördermöglichkeiten .....                                    | - 58 - |
| 4.4 Umstellung der ersten Linie .....                            | - 59 - |
| 4.5 Weitere Umstellungsphasen .....                              | - 64 - |
| 5. Gesamtfazit und Diskussion .....                              | - 70 - |
| Referenzen .....   | - 71 - |

## *Executive Summary / Zusammenfassung*

Die vorliegende Studie umfasst die betriebliche, technische, wirtschaftliche und ökobilanzielle Bewertung einer Elektrifizierung der Buslinien im Bedienungsgebiet der Duisburger Verkehrsgesellschaft (DVG) und entwickelt – aufbauend auf den Ergebnissen – ein konkretes Umstellungskonzept der gesamten Flotte auf Elektrobusse. Im Rahmen der Studie wurden 21 reguläre Linien, eine Schnellbuslinie und sechs Nachtlinien betrachtet. Prämisse bei der Analyse war, dass der Liniendienst in der im 3. Nahverkehrsplan der Stadt Duisburg definierten Form beibehalten wird. Die Fahrgäste sollen hinsichtlich der Beförderungsleistung, aber auch hinsichtlich der Komfortmerkmale der Fahrzeuge keine Einschränkungen durch eine Elektrifizierung erfahren.

### **Elektrobuskonzepte**

In der Studie wurden unter dem Überbegriff „Elektrobusse“ sowohl Batteriebusse, als auch Brennstoffzellenhybridbusse analysiert. Wesentliche Herausforderungen bei der Umstellung auf Elektrobusse sind ihre begrenzte Reichweite und der Nachladebedarf während des Tages. Insbesondere bei Batteriebussen kann dies zu einem Fahrzeugmehrbedarf und weiteren betrieblichen Mehrkosten führen. Es wurden verschiedene Ladestrategien für Batteriebusse untersucht: die ausschließliche Ladung auf dem Betriebshof („Depotladung“) und die zusätzliche Nachladung an geeigneten Endstellen der Linien („Gelegenheitsladung“). Dabei hat die ausschließliche Depotladung den Vorteil, dass Ladeinfrastruktur nur auf dem Betriebshof installiert werden muss, nicht im öffentlichen Raum. Typischerweise haben Batteriebusse mit diesem Ladekonzept den höchsten Fahrzeugbedarf und die entsprechenden Batteriesysteme fallen sehr groß aus. Im Gegensatz dazu werden bei der Gelegenheitsladung die Batteriebusse zusätzlich während Stillstandzeiten an einer oder mehreren Endstellen der Linie geladen. Dadurch lässt sich die Größe der Batteriesysteme deutlich reduzieren und im Regelfall liegt der Fahrzeugbedarf niedriger als bei der Depotladung. Allerdings muss Ladeinfrastruktur an den Endstellen, d.h. im öffentlichen Raum, installiert werden, was nicht bei allen Endstellen möglich ist. Die in dieser Studie betrachteten Brennstoffzellenhybridbusse werden ausschließlich im Betriebshof nachgetankt.

Die Reichweite der Fahrzeuge ist eng mit dem Energiebedarf verknüpft. Dieser kann unterteilt werden in zwei wesentliche Bestandteile, dem Energiebedarf für Traktion und dem Energiebedarf für die Heizung und Klimatisierung des Innenraums (Heizung-Lüftung-Klimatisierung, HLK). Insbesondere bei sehr hohen oder sehr niedrigen Außentemperaturen verbraucht 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 Batteriebusse einen Brennstoff-Zuheizer einzubauen, sodass die Batterie nicht für extreme Temperaturen ausgelegt werden muss, die nur an sehr wenigen Tagen im Jahr vorkommen. In der Studie wurden sowohl eine vollelektrische Heizung und Klimatisierung, als auch eine elektrische Klimatisierung mit zusätzlichem fossilen Brennstoff-Zuheizer

(„Hybridheizung“) betrachtet. Bei letzterer ist zu beachten, dass sie nur an wenigen Tagen im Jahr eingesetzt wird, da bei den häufiger auftretenden milderer Temperaturen weiterhin rein elektrisch geheizt wird.

### **Infrastruktur**

Zur Bewertung der technischen Machbarkeit und des Aufwands der Einrichtung von Gelegenheitslader-Konzepten wurden alle 83 angefahrenen Endstellen im DVG Bedienungsgebiet hinsichtlich ihrer Eignung zur Errichtung von Ladeinfrastruktur untersucht. Für die Errichtung von Ladeinfrastruktur wurden Endstellen ausgeschlossen, die nicht in Duisburg liegen, die an regulären Wochentagen wenig frequentiert werden und die keinen ausreichenden Bauplatz aufweisen. Insgesamt ergibt sich für zwölf Endstellen eine potentielle Eignung zur Errichtung von Ladeinfrastruktur.

Bei Einsatz von Brennstoffzellenhybridbussen wird Wasserstoff ( $H_2$ ) in gasförmigem Zustand benötigt, mit dem die Fahrzeuge betankt werden. Die Erzeugung des Wasserstoffs kann dabei auf dem Betriebshof stattfinden oder durch eine externe Anlage erfolgen. Im Fall einer externen Erzeugung muss der Wasserstoff angeliefert werden. Aufgrund des nicht unerheblichen Verbrauchs einer ganzen Busflotte sollte die Anlieferung auf dem Straßenwege aufgrund der höheren erreichbaren Transportkapazität (weniger Anlieferungsfahrten) mit flüssigem Wasserstoff erfolgen. Vor der Betankung muss der flüssige Wasserstoff wieder in den gasförmigen Zustand gebracht werden. Der Flächenbedarf für die Tankanlage ist nicht unerheblich, da die Systeme aufgrund von Wartungs- und Kontrollbedarf in der Regel ebenerdig installiert werden. Auf dem Betriebshof Am Unkelstein ist es möglich, Infrastruktur zur Betankung von Brennstoffzellenbussen zu errichten. Für eine Erzeugung des Wasserstoffs auf dem Betriebshof ist ein Elektrolyseur notwendig, wodurch der Flächenbedarf weiter deutlich erhöht wird. Dies ist auf dem Betriebshof Am Unkelstein dagegen nur mit erheblichen baulichen Eingriffen umsetzbar (z.B. Verwenden von Teilen des Parkplatzes vor dem Betriebshof).

Der derzeitig vorhandene Stromnetzanschluss des Betriebshofs Am Unkelstein reicht für die erste Umstellungsphase (Phase A) aus, um die Batteriebusse zu laden, so dass hierzu kein Ausbau des öffentlichen Netzes vorgenommen werden muss. Unter gewissen Umständen gilt dies auch noch für die zweite Umstellungsphase (Phase B). In der Werkstatt des Betriebshofs werden Dacharbeitsplätze inkl. Dachlastkran erforderlich. Die Hallenabstellung der Busse erleichtert grundsätzlich die Elektrifizierung, da Temperaturen unterhalb  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  vermieden werden können. Stellplatz für zusätzliche Busse kann eingerichtet werden, und zwar in begrenztem Umfang in der Abstellungshalle und darüber hinaus in Außenaufstellung. Platz für Ladegeräte ist außerhalb der Abstellungshalle ausreichend vorhanden. Bezüglich der Kontaktierungstechnik zur Energiezufuhr von den Ladegeräten zu den Fahrzeugen kommen verschiedene Systeme in Frage. An dieser Stelle wird langfristig eine einheitliche Lösung mit fahrzeugseitigem Pantographen empfohlen, um eine einheitliche automatisierte Kontaktierung an sämtlichen Ladeorten inkl. der Ladestationen an Endstellen zu realisieren, ohne dass die Fahrer mit Ste-

ckern und Kabeln die Verbindung von Hand herstellen müssen. In der Abstellhalle ist die Dachkonstruktion hinsichtlich der Eignung zur Anbringung von Ladeinfrastruktur (Gegenstück zum busseitigen Pantographen inkl. Kabelführung) zu prüfen und ggf. zu verstärken. Darüber hinaus ist die derzeitige Brandschutzeinrichtung hinsichtlich Eignung bzw. Umrüstungsbedarf bei Abstellung von Elektrobussen zu prüfen.

### **Technische Machbarkeit, finanzielle Auswirkungen und Umweltwirkung**

Für jedes Elektrobuskonzept wurde der Fahrzeugmehrbedarf sowie die betrieblichen Mehraufwendungen ermittelt. Der Fahrzeugmehrbedarf ist von entscheidender Bedeutung – hauptsächlich aufgrund der mit den zusätzlichen Fahrzeugen verbundenen Investitionskosten, allerdings auch in Hinblick auf die begrenzten Stellflächen im Betriebshof. Der höchste Fahrzeugbedarf ergibt sich für die Linien der DVG für Batteriebusse mit ausschließlicher Depotladung. Vor allem bei einem Betrieb mit Gelenkbussen und vollelektrischer Heizung steigt die linienspezifisch benötigte Fahrzeuganzahl signifikant an. Bei Gelegenheitsladung ergibt sich im Vergleich zur Dieselreferenz in vielen Fällen kein Fahrzeugmehrbedarf. Lediglich für den Betrieb mancher Linien wird ein moderater Fahrzeugmehrbedarf von ein bis zwei Fahrzeugen benötigt, um an Endstellen ausreichend Stillstandszeit garantieren zu können (z.B. durch zusätzliche Überlage). Für Brennstoffzellenhybridbusse resultiert aufgrund ihrer hohen Reichweite und der kurzen Tankzeiten im Allgemeinen der geringste Fahrzeugmehrbedarf. Sie sind daher deutlich schneller wieder einsatzbereit als beispielsweise Batteriebusse mit Depotladung. Die daraus resultierende höhere betriebliche Flexibilität ist ein Vorteil gegenüber Batteriebussen, insbesondere vor dem Hintergrund von Schienenersatz- und Sonderverkehren.

Um die verschiedenen Elektrobuskonzepte wirklich aussagekräftig miteinander vergleichen zu können, muss eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgen, welche die konzeptspezifischen betrieblichen Mehraufwendungen berücksichtigt und finanziell bewertet. Im Rahmen der Studie wurden daher die Total Cost of Ownership (TCO) für alle Elektrobuskonzepte auf allen Linien ermittelt und mit der Referenz „Dieselbus Euro VI“ verglichen. Im Allgemeinen sind Brennstoffzellenhybridbusse das mit Abstand kostenintensivste Konzept. Die Kosten über den gesamten Betrachtungszeitraum betragen das 1,9 bis 2,5-fache der Dieselreferenz. Der Grund hierfür liegt in den hohen Kosten für die Herstellung und Bereitstellung von „grünem“ Wasserstoff sowie in den Kosten und der Lebensdauer des gesamten Brennstoffzellen- und Speichersystems. Selbst unter optimistischen Annahmen für die zukünftige Entwicklung der Brennstoffzellentechnologie sind Brennstoffzellenhybridbusse nur bei sehr geringen Wasserstoffkosten von etwas über 3 €/kg wettbewerbsfähig gegenüber Batteriebussen. Die aktuellen Wasserstoffbezugskosten im betrachteten Szenario sind mehr als dreimal so hoch, sodass Brennstoffzellenhybridbusse trotz ihrer betrieblichen Vorteile nicht empfohlen werden.

Dort wo an den Endstellen Ladeinfrastruktur errichtet werden kann, sind Batteriebusse mit dem Konzept der Gelegenheitsladung für die regulären Linien in der Regel die kosteneffizienteste Lösung. Die Investitionskosten für die Ladeinfrastruktur fallen im Vergleich zu den Beschaffungskosten für die Fahrzeuge inkl. der Energiespeichersysteme sowie im Vergleich zu

den Betriebskosten nur gering ins Gewicht. Die TCO der preiswertesten Gelegenheitsladerlösungen liegen beim 1,2-fachen bis zum 1,5-fachen der Dieselreferenz, abhängig von der betrachteten Linie. Für den Großteil der Linien ist dabei eine Ladung mit 300 kW Leistung während Stillstandzeiten an den Endstellen ausreichend. Für Linien, die mit Gelegenheitsladung an den Endstellen nicht elektrifiziert werden können (z.B. aufgrund mangelnder Stillstandszeiten oder nicht installierbarer Infrastruktur), ist ein Betrieb mit Depotlader-Batteriebusen das wirtschaftlichste Elektrobuskonzept. Die Kosten für Depotladung schwanken zwischen den einzelnen Linien. An dieser Stelle ist die Wahl des Heizkonzeptes insbesondere für Depotlader und die verbaute Batteriekapazität entscheidend. Die Verwendung von Hybridheizungen mit Brennstoff-Zuheizern wird empfohlen. In vielen Fällen kann dadurch die Fahrzeuganzahl reduziert und der Fahrzeugmehrbedarf in den Betriebshöfen begrenzt werden und die Planungssicherheit verbessert werden.

Bei ausschließlicher Verwendung von (bilanziell) emissionsfreiem Strom (erneuerbare Energiequellen) unterscheiden sich die Elektrobuskonzepte bezüglich ihrer Umweltauswirkungen kaum. Durch die Umstellung auf Elektrobusse können gegenüber der Dieselreferenz mit Abgasnorm Euro VI erhebliche Mengen an globalen und lokalen Emissionen eingespart werden. Bei einer vollständigen Umstellung auf Elektrobusse mit Hybridheizung (Brennstoff-Zuheizer mit Heizöl) können jährlich rund 16.000 t CO<sub>2</sub>, 5,9 t NO<sub>x</sub> und 120 kg Feinstaub eingespart werden. Die Verwendung eines Brennstoff-Zuheizers in den Elektrobussen hat, verglichen mit der Dieselsbusreferenz, nur einen geringen Einfluss auf die Bilanz. Da auch dieses Heizkonzept an den meisten Tagen rein elektrisch heizt und die Brennstoff-Zuheizer nur an wenigen Tagen verwendet werden müssen, sind die dadurch verursachten Emissionen gering.

### **Umstellungskonzept**

Aufbauend auf der detaillierten technischen, betrieblichen, ökonomischen und ökologischen Analyse wurde in der Studie ein Umstellungskonzept erarbeitet, welches eine schrittweise Einführung von Elektrobussen beschreibt. Ausgehend von den zuvor ermittelten Auswirkungen und den zu erwartenden zukünftigen technischen Weiterentwicklungen wurden zunächst zwei Umsetzungszeiträume I) 2020 bis 2025 und II) ab 2026 definiert. Eine Zuordnung zum zweiten Zeitraum erfolgte immer dann, wenn Linien von technischen Weiterentwicklungen deutlich profitieren können, beispielsweise bei einer Reduzierung des Fahrzeugmehrbedarfs durch größere Reichweiten. Eine Prognose der Weiterentwicklungen für einen längeren Zeitraum ist jedoch immer mit Unsicherheiten behaftet. Die im Nachfolgenden beschriebenen Umsetzungsphasen beziehen sich daher auf den ersten Zeitraum und detaillieren diesen. Für Linien aus dem zweiten Umsetzungszeitraum erfolgt sinnvollerweise in 2024 oder 2025 eine Überprüfung der getroffenen Annahmen und ggf. eine Neubewertung.

Mit den notwendigen Vorlaufzeiten für die Beschlussfassung, die Finanzierung, die Beschaffung und Lieferung der ersten Fahrzeuge erscheint eine frühestmögliche Umstellung ab 2020 realistisch. Für die erste Phase (Phase A, 2020) empfiehlt es sich, Linie 934 mit Gelegenheits-

ladung zu elektrifizieren. Da eine der Endstellen der Linie in unmittelbarer Nähe zum Betriebshof liegt, werden Infrastrukturmaßnahmen nur auf dem Betriebshof und nicht im öffentlichen Raum notwendig. Der auf dem Betriebshof bestehende Stromnetzanschluss reicht aus. All dies vereinfacht die Umsetzung deutlich und ermöglicht eine schnellere Umsetzung der Elektrifizierung, d.h. bis 2020. Weiterhin werden Instandhaltungsarbeiten an der Infrastruktur vereinfacht und die Schnellladegeräte auf dem Betriebshof können später auch von Fahrzeugen anderer Linien mitgenutzt werden. Die Linie erreicht durch ihre Streckenführung eine hohe Sichtbarkeit. Für die benötigten sieben Elektrobusse (Gelenkbusse) entstehen rund 3 Mio. € zusätzliche Investitionskosten verglichen mit der Dieselbusreferenz. Die höheren Investitionskosten können nur teilweise durch die geringeren laufenden Kosten ausgeglichen werden. Eine Förderung von 80 % der Mehrkosten (gegenüber Dieselbussen) reduziert die Anfangsinvestitionen auf etwa 900.000 €. Kosten für die Umrüstung der Werkstatt und der Abstellungshalle sowie für das Projektmanagement u.Ä. sind darin noch nicht enthalten, zum Teil aber förderfähig.

Die Erfahrungen aus der Beschaffung und dem Betrieb der ersten Elektrobusse können anschließend in der zweiten Phase (Phase B, 2022) genutzt werden. Es bietet sich an, in dieser Phase die Gelegenheitsladung weiter auszubauen. Dazu wird der Bau von Ladestationen an den Endstellen Marxloh Pollmann, Landschaftspark Nord und Winkelhausen Bruchstraße notwendig, und es sind 27 Elektrobusse (Solo- und Gelenkbusse) zu beschaffen. Insgesamt entstehen bei Umsetzung des Konzeptes verglichen mit einer Beschaffung von Dieselbussen rund 10 Mio. € zusätzliche Investitionskosten, welche durch Fördermittel signifikant gesenkt werden können.

Auch für die dritte Phase (Phase C, 2024) wird empfohlen, weitere Linien mit Gelegenheitsladung zu elektrifizieren. Bei Umsetzung des Konzepts sind für die dritte Phase insgesamt 29 Fahrzeuge (Solo- und Gelenkbusse) zu beschaffen. Das Umstellungskonzept sieht zusätzlich vor, an den Endstellen Duisburg Hbf Osteingang, Uni Nord und Ehinger Berg Ladestationen zu bauen. Darüber hinaus muss für die Ringlinie Mitte 1 eine geeignete Endstelle identifiziert werden, an der es möglich ist, Ladeinfrastruktur zu errichten. Die zusätzlichen Investitionskosten für Elektrobusse betragen in dieser Phase erneut rund 10 Mio. €. Für die in Phase C umzustellenden Linien SB40, Mitte 1 und Süd 1 ist zu beachten, dass sie von zurzeit in Planung befindlichen Änderungen betroffen sein werden, die sich auf die Empfehlungen zur Ausgestaltung des entsprechenden Elektrobuskonzepts auswirken können.

Die Umsetzung der ersten drei Phasen des Umstellungskonzepts ermöglicht einen Austausch von 61 Dieselbussen durch 63 Elektrobusse bis 2026. Hierfür sind in Summe zusätzliche Anfangsinvestitionen in Höhe von rund 23 Mio. € notwendig, welche durch öffentliche Fördermittel deutlich reduziert werden können. Insgesamt können erhebliche Mengen an Emissionen eingespart werden. Nach Abschluss der dritten Phase belaufen sich diese jedes Jahr auf rund 7.500 t CO<sub>2</sub>, 2,7 t Stickoxide und 58 kg Feinstaub.

Die in der Studie durchgeführten Kostenbetrachtungen orientieren sich am aktuellen Markt und an der aktuellen gesetzlichen Situation und stellen somit in gewisser Hinsicht konservative Abschätzungen dar. Politische Entscheidungen, wie z.B. die im aktuellen Koalitionsvertrag der Bundesregierung geplante Reduktion der EEG-Umlage auf Strom für Elektrobusse, oder ein deutlich verstärkter Markthochlauf mit einer über die Annahmen der Studie hinausgehenden Kostendegression, beispielsweise verursacht durch den bevorstehenden Markteintritt der beiden größten europäischen Bushersteller, können die Wirtschaftlichkeit der Elektrobussysteme deutlich verbessern und eine Elektrifizierung weiter begünstigen.

### **Gesamtfazit**

Zusammenfassend lässt sich aus den Ergebnissen der Studie schlussfolgern, dass die Elektrifizierung für einen Teil der Linien nach dem 3. Nahverkehrsplan der Stadt Duisburg bereits heute mit aktueller Technik möglich ist. Besonders geeignet hierfür ist ein Flottenmix aus Batteriebusen mit Depot- und Gelegenheitsladung. Unter Ausnutzung der Flexibilitätsoptionen, die die jeweils verbleibende Dieselbus-Restflotte bietet, bietet sich zunächst die Elektrifizierung von Linien mittels der oftmals kosteneffizienteren Gelegenheitslader-Elektrobusse an. Mit dem sukzessiven Austausch der verbleibenden Dieselbusse durch Elektrobusse empfiehlt sich auch die Einführung von Depotlader-Elektrobussen mit großen Batterien, um eine größere Einsatzflexibilität zu erzielen.

Im direkten Vergleich zur Dieselmotortechnologie können große Mengen Emissionen eingespart werden. Die Elektrifizierung führt zu deutlich höheren Anfangsinvestitionen aufgrund der höheren Fahrzeugpreise und Infrastrukturkosten. Die Mehrkosten können nicht durch geringere operative Kosten kompensiert werden, sodass bei einer TCO-Betrachtung ein Mehrbedarf deutlich wird, der einer Förderung durch die öffentliche Hand bedarf.

## Studieninhalte

Die vorliegende Studie „Elektrobuseinsatz in Duisburg“ untersucht und bewertet das gesamte Busnetz der Duisburger Verkehrsgesellschaft (DVG) in Duisburg hinsichtlich einer Elektrifizierung und erarbeitet ein Umstellungskonzept. Sie gliedert sich in vier Arbeitspakete, welche in Abbildung 1 dargestellt sind.

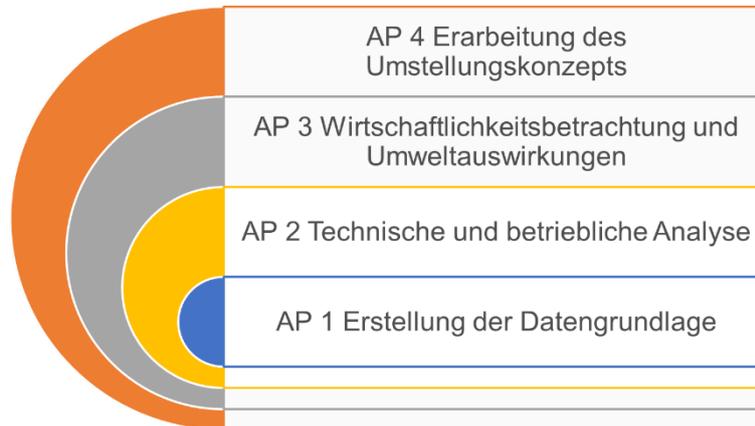


Abbildung 1: Übersicht Struktur der Studie in 4 Arbeitspaketen

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

## 1. Datengrundlage (Arbeitspaket 1)

Die Elektrifizierbarkeit eines Busnetzes wird maßgeblich durch lokale Spezifika beeinflusst. Beispielsweise variieren in Abhängigkeit vom Betriebsmodell und der Liniencharakteristik die zu erbringenden Fahrleistungen. Zudem sind nicht alle Orte für die Errichtung von Infrastruktur (Ladegeräte, Wasserstofftankstellen) geeignet. Die im Rahmen der Studie erarbeitete Datengrundlage bildet die lokalen Spezifika im Bedienungsgebiet der DVG ab und dient als Basis für die weitere Betrachtung.

### 1.1 Betriebsdaten

Eine Vorgabe für die Studie war es, dass eine Elektrifizierung keine negativen Auswirkungen auf die angebotene Beförderungsleistung im Bedienungsgebiet haben soll. Elektrobusse müssen also die gleichen Linienfahrten absolvieren, wie dies durch Dieselmotoren der Fall ist. Die in der Studie betrachtete Fahrleistung basiert auf dem 3. Nahverkehrsplan (NVP) für Duisburg (Februar 2017). Die betrachteten Betriebsdaten sind auf dem Stand von Juli 2017. Die Datengrundlage umfasst insgesamt 28 Linien, davon 1 Schnellbuslinien, 6 Nachtlinien und 21 reguläre Linien. Ein Überblick über die betrachteten Linien ist Tabelle 1 zu entnehmen.

| Linie (NVP)     | Ref.-Nr. | Typ                         |
|-----------------|----------|-----------------------------|
| <b>SB40</b>     | 40       | Schnellbus                  |
| <b>N1</b>       | 801      | Nachtbus                    |
| <b>N2</b>       | 802      | Nachtbus                    |
| <b>N3</b>       | 803      | Nachtbus                    |
| <b>N4</b>       | 804      | Nachtbus                    |
| <b>N5</b>       | 805      | Nachtbus                    |
| <b>N6</b>       | 806      | Nachtbus                    |
| <b>Nord 1</b>   | 905      | Quartiersbus<br>(Ringlinie) |
|                 | 906      |                             |
| <b>Nord 2</b>   | 907      | Stadtbus                    |
| <b>908</b>      | 908      | Regionalbus                 |
| <b>Nord 3</b>   | 909      | Stadtbus<br>(Ringlinie)     |
|                 | 910      |                             |
| <b>West 1_1</b> | 916      | Stadtbus                    |
| <b>West 1_2</b> | 917      | Stadtbus                    |
| <b>924</b>      | 920      | Stadtbus                    |

| Linie (NVP)     | Ref.-Nr. | Typ                         |
|-----------------|----------|-----------------------------|
| <b>921-1</b>    | 921      | Regionalbus                 |
| <b>West 2_1</b> | 922      | Stadtbus                    |
| <b>West 2_2</b> | 923      | Stadtbus                    |
| <b>West 3</b>   | 924      | Stadtbus                    |
| <b>926</b>      | 926      | Stadtbus                    |
| <b>928</b>      | 928      | Stadtbus                    |
| <b>Mitte 1</b>  | 930      | Quartiersbus<br>(Ringlinie) |
|                 | 931      |                             |
| <b>933</b>      | 933      | Stadtbus                    |
| <b>934</b>      | 934      | Stadtbus                    |
| <b>935</b>      | 935      | Regionalbus                 |
| <b>939</b>      | 939      | Regionalbus                 |
| <b>Süd 3</b>    | 940      | Quartiersbus                |
| <b>Süd 1</b>    | 941      | Quartiersbus                |
| <b>Süd 2</b>    | 942      | Quartiersbus                |

Tabelle 1: In der vorliegenden Studie betrachtete Linien

Für die Studie wird angenommen, dass die gesamte Fahrleistung der Linien mit Fahrzeugen der DVG erbracht wird. Alle Fahrzeuge wurden dabei dem Betriebshof Am Unkelstein zugeordnet. Schienenersatzverkehr und E-Wagenfahrten wurden im Rahmen der Studie nicht explizit betrachtet.

Für die Bewertung der technischen Machbarkeit ist die Auswahl des betrieblich anspruchsvollsten Betriebstags notwendig. Für die regulären Linien ist dies der Wochentag ohne Ferien (Dienstag, Tagesart-ID 88) und für die Nachtlinien der Übergang von Samstag auf Sonntag (Samstag, Tagesart-ID 6). Alle Fahrten auf diesen Linien wurden erfasst und anhand ihrer Betriebsdaten charakterisiert. Weiterhin wurde das Höhenprofil der Linien ermittelt, wodurch zusätzlich eine Charakterisierung bezüglich der Topographie möglich wurde.

Alle bis auf 2 Buslinien haben eine eindeutige Gefäßgröße zugewiesen. Linie 920 hat einen Fahrzeugumlauf mit Solobussen gegenüber 9 Umläufen mit Gelenkbussen. Für diese Linie wurde daher angenommen, dass es sich ausschließlich um Gelenkbusse handelt. Linie 933 hat 3 Solobus-Umläufe gegenüber 6 Gelenkbus-Umläufen. Beides wird daher separat betrachtet (Linie 9331: Solobus-Umläufe, Linie 9332: Gelenkbus-Umläufe), wie in Kapitel 2.2 erläutert wird.

Einen wesentlichen Einfluss auf den Energiebedarf von Elektrobussen haben neben dem Gewicht der Fahrzeuge vor allem die Durchschnittsgeschwindigkeit der Linienfahrt. Aus diesem Grund wurden die Fahrten zur Bedienung des Liniendienstes anhand ihrer Durchschnittsgeschwindigkeit kategorisiert. Tabelle 2 zeigt die Zuordnung der verschiedenen Fahrten (Anzahl) der einzelnen Linien zu den Kategorien.

| Ref.-<br>Nr. | Geschwindigkeit |                        |           |
|--------------|-----------------|------------------------|-----------|
|              | < 20 km/h       | 20 km/h bis<br>25 km/h | > 25 km/h |
| 40           | -               | -                      | 4         |
| 801          | 2               | -                      | -         |
| 802          | 2               | -                      | -         |
| 803          | -               | 1                      | 1         |
| 804          | -               | 2                      | -         |
| 805          | 2               | -                      | -         |
| 806          | 2               | -                      | -         |
| 905          | 1               | 1                      | -         |
| 906          | -               | 2                      | -         |
| 907          | 3               | 1                      | -         |
| 908          | 6               | -                      | -         |
| 909          | 1               | 1                      | -         |
| 910          | 1               | 1                      | -         |
| 916          | 3               | 1                      | -         |
| 917          | 2               | 2                      | -         |
| 920          | 6               | 1                      | -         |

| Ref.-<br>Nr. | Geschwindigkeit |                        |           |
|--------------|-----------------|------------------------|-----------|
|              | < 20 km/h       | 20 km/h bis<br>25 km/h | > 25 km/h |
| 921          | 2               | 2                      | -         |
| 922          | 4               | -                      | -         |
| 923          | 1               | 3                      | -         |
| 924          | -               | 4                      | -         |
| 926          | -               | 5                      | -         |
| 928          | -               | 1                      | 1         |
| 930          | 1               | 1                      | -         |
| 931          | 4               | -                      | -         |
| 933          | 6               | -                      | -         |
| 934          | 2               | 4                      | -         |
| 935          | 2               | 5                      | -         |
| 939          | 2               | 2                      | -         |
| 940          | 4               | 2                      | -         |
| 941          | 1               | 3                      | -         |
| 942          | -               | 4                      | -         |

Tabelle 2: Kategorisierung der Fahrten der Linien abhängig von Durchschnittsgeschwindigkeit

Anhand dieser Kategorien erfolgt in AP 2 die Energieverbrauchsbestimmung. Hierzu wurden ausgewählte Referenzfahrten im Detail nachgebildet. Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen den Verlauf zweier solcher Fahrten, die nachgebildet wurden.

Verspätungen können erheblichen Einfluss auf die technische Machbarkeit einer Elektrifizierung nehmen. Dies betrifft insbesondere Gelegenheitslader, für die Verspätungen zu Verkürzung oder sogar Ausfall von Ladephasen führen können. In Absprache mit der DVG wurde die generelle Regel angesetzt, dass nach jeder Fahrt ein Verspätungspuffer von 10% der Fahrdauer dieser Fahrt, mindestens aber 3 Minuten, gewährleistet werden muss. Zusätzlich wurden die von der DVG bereitgestellten Betriebsdaten hinsichtlich der tatsächlich eingeplanten Anschlüsse ausgewertet und bei Linien, bei denen die Wendezeiten die nach oben genannter Regel ermittelten Pufferzeiten unterschritten, die Regel entsprechend angepasst, so dass auch bei der Neuplanung der Umläufe entsprechende Anschlüsse realisiert werden können.

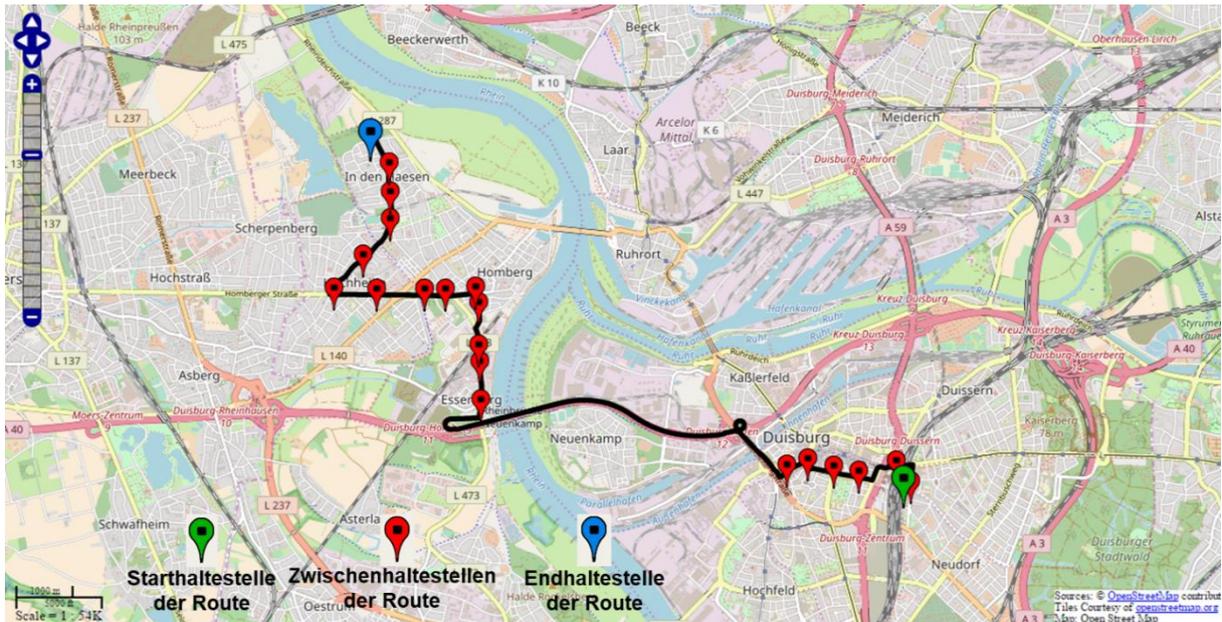


Abbildung 2 Verlauf von Linie 926, Variante 9



Abbildung 3 Verlauf von Linie 933, Variante 1

Bei der Analyse und Bewertung von Depotladern 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 dem Busdepot. Zusätzliche Leerfahrten wurden anhand eines Routings unter Berücksichtigung der konkreten Verkehrssituation erstellt und in die Datenbasis aufgenommen.

## 1.2 Technische Grundlagen

Die Studie umfasst die Analyse der gängigen vollelektrischen Bussysteme, welche einen lokal (fast<sup>1</sup>) emissionsfreien Betrieb ermöglichen. Es werden Batteriebusse sowohl mit ausschließlicher Depotladung, als auch mit Gelegenheitsladung betrachtet. Zudem werden mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellenhybridbusse analysiert, welche nachfolgend vereinfacht als Brennstoffzellenbusse bezeichnet werden. Alle Technologien werden derzeit am Markt angeboten, jedoch variiert die Anzahl der Hersteller mitunter stark.

### 1.2.1 Fahrzeugtechnologien und -konfigurationen

Die Mehrheit der Elektrobushersteller verfolgt einen modularen Ansatz, bei dem die Fahrzeuge in unterschiedlichen Ausprägungen konfiguriert werden können. Dies umfasst unterschiedliche Batteriegrößen, aber auch verschiedene Ladeleistungen und Koppelsysteme. Anhand der am Markt verfügbaren Fahrzeuge wurden Referenzbustypen hergeleitet, welche in Abbildung 4 dargestellt sind. Die wesentlichen technischen Parameter sind in Tabelle 3 für Batteriebusse und in Tabelle 4 für Brennstoffzellenbusse aufgeführt.

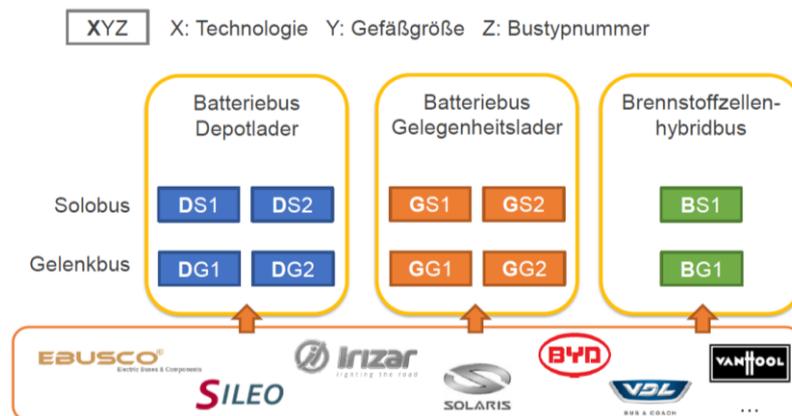


Abbildung 4: In der Studie betrachtete Referenzbustypen

<sup>1</sup> Einige Systeme verwenden Brennstoff-Zuheizer („Hybridheizung“), welche Schadstoffe emittieren. Allerdings sind auch Fahrzeuge mit rein elektrischem Heizsystem streng genommen nicht 100% emissionsfrei, da der Brems- und Reifenabrieb sowie Aufwirbelung von Straßenstaub weiterhin vorhanden sind.

| Parameter                             | Depotlader Typ 1 |            | Depotlader Typ 2 |            | Gelegenheitslader Typ 1 |            | Gelegenheitslader Typ 2 |            |
|---------------------------------------|------------------|------------|------------------|------------|-------------------------|------------|-------------------------|------------|
|                                       | Solo DS1         | Gelenk DG1 | Solo DS2         | Gelenk DS2 | Solo GS1                | Gelenk GG1 | Solo GS2                | Gelenk GG2 |
| Batteriekapazität (installiert) [kWh] | 250              | 300        | 350              | 400        | 180                     | 220        | 180                     | 220        |
| Batteriekapazität (nutzbar) [kWh]     | 180              | 216        | 252              | 288        | 108                     | 132        | 108                     | 132        |
| Ladeleistung Depot [kW]               | 120              | 120        | 120              | 120        | 80                      | 80         | 80                      | 80         |
| Ladeleistung Schnellladung [kW]       | -                | -          | -                | -          | 300                     | 300        | 450                     | 450        |

Tabelle 3: Technische Parameter Batteriebusse

| Parameter                            | Brennstoffzellenbus |            |
|--------------------------------------|---------------------|------------|
|                                      | Solo BS1            | Gelenk BG1 |
| Wasserstofftankkapazität [kg]        | 35                  | 45         |
| Leistung Brennstoffzellensystem [kW] | 60                  | 100        |

Tabelle 4: Technische Parameter Brennstoffzellenbusse

### Batteriebusse mit Depotladung

Bei Batteriebussen mit Depotladung hängt die Reichweite direkt von der installierten Batteriekapazität ab. Aussagen zur technischen Machbarkeit und zu betrieblichen Mehraufwendungen sind daher stark durch diesen Parameter beeinflusst. Basierend auf den aktuell am Markt erhältlichen Systemen und einer Abschätzung der zukünftigen Entwicklung wurden insgesamt vier unterschiedliche Batteriegrößen (zwei für Solobusse, zwei für Gelenkbusse) festgelegt. Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen die gewählten Werte und die Relationen zu den aktuellen Systemen am Markt.

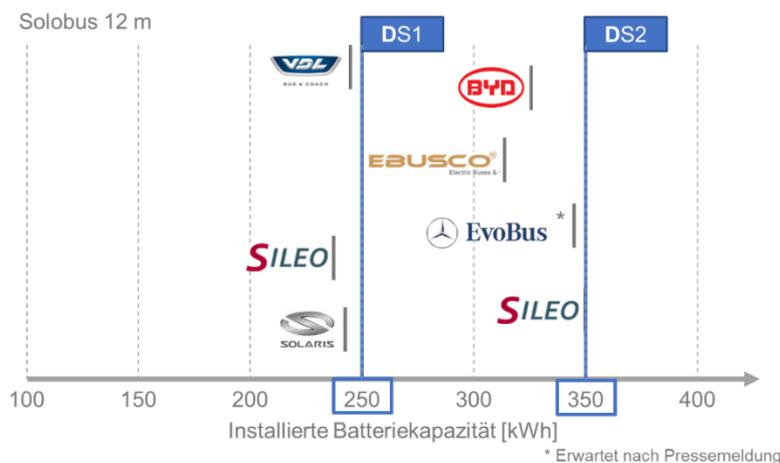


Abbildung 5: Batteriekapazitäten der Referenzsolobusse DS1 und DS2

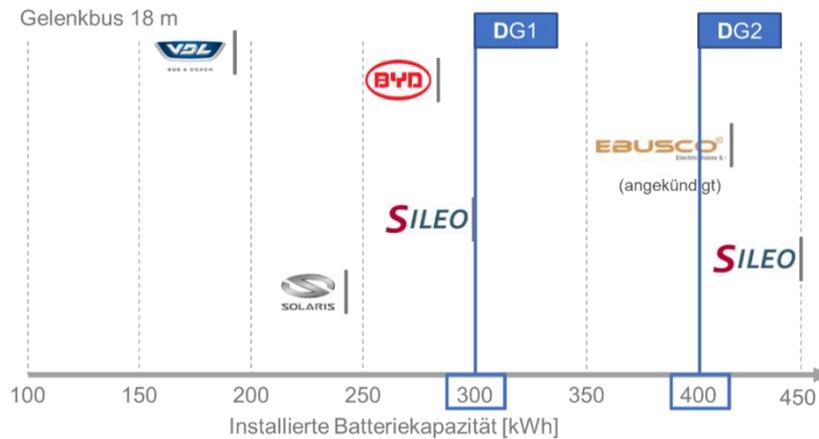


Abbildung 6: Batteriekapazitäten der Referenzgelenkbusse DG1 und DG2

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

### Batteriebusse mit Gelegenheitsladung

Ein regelmäßiges Nachladen auf der Strecke entkoppelt die Reichweite von der installierten Batteriekapazität. Entscheidend für die technische Machbarkeit bei Batteriebussen mit Gelegenheitsladung ist daher die Ladeleistung. Im Idealfall ist diese ausreichend, um innerhalb der in den Umlaufplänen vorhandenen Standzeit den Energiebedarf des vorherigen Abschnitts nachladen zu können und somit einen „ladungserhaltenden“ Betrieb zu gewährleisten.

Für die in der Studie betrachteten Referenzbustypen wurden zwei unterschiedliche Ladeleistungen definiert, welche sich an am Markt verfügbaren Systemen orientieren. Für Bustyp 1 (Solobus GS1 und Gelenkbus GG1) wurde eine Ladeleistung von 300 kW angenommen, was zum Beispiel dem Elektrobussystem in Köln entspricht. Eine Ladeleistung von 450 kW, wie beispielsweise in Hannover realisiert, wurde für Bustyp 2 (Solobus GS2 und Gelenkbus GG2) angenommen. Die Annahmen für die installierte Batteriegröße unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Gefäßgröße. Für Solobusse (GS1 und GS2) wurde eine Batteriekapazität von 180 kWh und für Gelenkbusse (GG1 und GG2) eine Batteriekapazität von 220 kWh festgelegt. An dieser Stelle sei erwähnt, dass es auf dem Markt auch Systeme mit deutlich kleineren Batteriekapazitäten gibt, beispielsweise in der Größenordnung von 60 oder 70 kWh für einen Solobus. Allerdings führen solch geringe Batteriekapazitäten zu deutlich reduzierter Einsatzflexibilität. Die Fahrzeuge sind somit deutlich stärker an die Ladeinfrastruktur gebunden, und die erreichbare Reserve bei Ausfall der Ladeinfrastruktur ist sehr begrenzt.

## Brennstoffzellenbusse

Verschiedene Pilot- und Demonstrationsprojekte mit Brennstoffzellenbussen wurden in den vergangenen Jahren durchgeführt. Die Anzahl der aktuell am Markt angebotenen Brennstoffzellenbusse ist allerdings begrenzt. Für diese Technologie wurde ein Fahrzeugtyp definiert, welcher sich in den beiden Gefäßgrößen bezüglich des installierten Brennstoffzellensystems und der Wasserstofftankkapazität unterscheidet. Für die Gefäßgröße Solobus (BS1) ist die Brennstoffzellenleistung zu 60 kW definiert und der Tankinhalt zu 35 kg H<sub>2</sub>. Beim Gelenkbus (BG1) betragen die Werte 100 kW und 45 kg H<sub>2</sub>.

### 1.2.2 Nebenverbraucher und Klimatisierungskonzepte

In Elektrobussen gibt es verschiedene Energieverbraucher. Der Energiebedarf lässt sich in zwei Kategorien aufteilen. Zum einen benötigt das elektrische Antriebssystem Energie, um den Bus zu beschleunigen. Zum anderen müssen die Nebenaggregate versorgt werden. Neben dem Druckluftkompressor, der Lenkunterstützung sowie den Informations- und Beleuchtungssystemen ist vor allem das Heizungs-, Lüftungs- und Kühlsystem (HLK) ein wesentlicher Verbraucher. Anders als in den konventionellen Dieselnbussen ist die für die Innenraumheizung nutzbare Abwärme in Batteriebusen kaum und in Brennstoffzellenbussen nur mäßig vorhanden. Es wird daher ein zusätzliches Heizsystem eingesetzt, das die Wärme im Fahrzeug erzeugt. Dabei gibt es verschiedene Arten der Wärmeerzeugung.

Der Energiebedarf eines Elektrobusses kann sich durch das HLK-System erheblich erhöhen, abhängig von den Umgebungsbedingungen. Entsprechend kann sich die Reichweite deutlich reduzieren. Dies muss bei der Analyse der technischen Machbarkeit und der Bestimmung der betrieblichen Mehraufwendungen berücksichtigt werden. Um den Einfluss des HLK-Systems bewerten zu können, wurden zwei unterschiedliche Nebenverbraucher szenarien definiert und für alle Elektrobustypen analysiert.

Eine Vorgabe für diese Studie war, dass die Elektrobusse die gleichen Komfortmerkmale wie die aktuellen Dieselnbuse aufweisen sollen. Eine Vollklimatisierung der Fahrzeuge im Sommer ist daher erforderlich. Versorgt wird das Kühlsystem bei allen betrachteten Elektrobustypen mit elektrischer Energie, die aus der Batterie oder der Brennstoffzelle stammt. Für den Heizbetrieb im Winter gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die in den nachfolgenden Nebenverbraucherkonfigurationen (NV-Konfiguration) zusammengefasst sind:

- [NV-A] Batteriebus mit elektrisch betriebener Wärmepumpe und vollelektrischer Heizung
- [NV-B] Batteriebus mit elektrisch betriebener Wärmepumpe und fossilem Zuheizung („Hybridheizung“)
- [NV-C] Brennstoffzellenbus mit vollelektrischer Heizung

Bei milden Temperaturen (ca. 2 – 10 °C) ist es bei Batteriebusen möglich, den Innenraum mit einer elektrisch betriebenen Wärmepumpe zu heizen. Bei tieferen Temperaturen arbeitet die Wärmepumpe weniger effizient, wodurch ein Zuheizsystem erforderlich wird. In NV-Konfiguration A ist dieses ein elektrischer PTC-Heizer und in Konfiguration B ein fossiler Zuheizsystem, der sowohl mit Diesel, als auch mit Bioethanol betrieben werden kann. Brennstoffzellenbusse haben den Vorteil, dass ein Teil der Abwärme der Brennstoffzelle zum Heizen des Innenraums genutzt werden kann. Allerdings ist auch hier bei sehr tieferen Temperaturen eine Zuheizung erforderlich, die in den aktuell am Markt erhältlichen Fahrzeugen elektrisch ausgeführt ist.

Zur Überprüfung der technischen Machbarkeit ist es erforderlich, den jeweils kritischsten Fall (Worst Case) einer NV-Konfiguration zu identifizieren und zu bewerten. Abbildung 7 zeigt eine schematische Darstellung und kennzeichnet die in der Studie betrachteten Worst-Case-Szenarien der elektrischen Leistung. In der Konfiguration ist der Worst-Case-Fall der Winterbetrieb bei aktivem elektrischem Zuheizsystem. Für Konfiguration B ändert sich dieses, da ein fossiler Zuheizsystem verwendet wird. Hier ist der Sommerbetrieb für die maximale elektrische Nebenverbraucherleistung maßgebend. Der Brennstoffzellenbus mit Konfiguration C ähnelt wiederum dem Batteriebus mit Konfiguration A, allerdings ist der Leistungsbedarf durch die Nutzung eines Teils der Brennstoffzellenabwärme im Winter geringer.

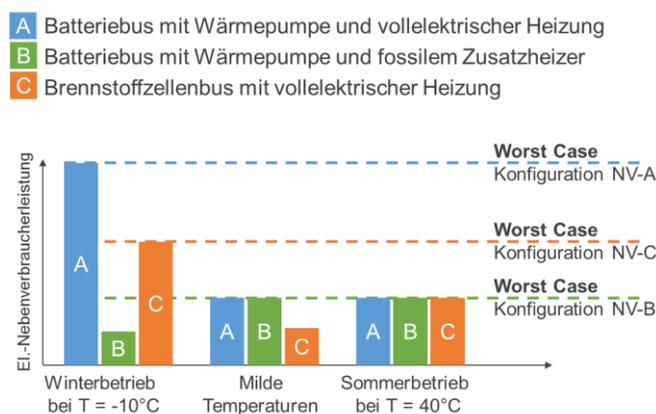


Abbildung 7: Schematische Darstellung der relevanten Worst-Case-Fälle unterschiedlicher NV-Konfigurationen

### 1.3 Ladeorte und Stromversorgung

Der Betrieb von Batteriebusen erfordert ein regelmäßiges Nachladen der Fahrzeuge. Ladeinfrastruktur wird daher sowohl bei Batteriebusen mit Depotladung als auch bei Gelegenheitsladung in den Betriebshöfen installiert. Weitere Ladestationen für die Gelegenheitsladung werden idealerweise an den Endstellen der Linien errichtet. Ladestationen an Unterwegshaltestellen sind aufgrund der sehr geringen Standzeit eher ungeeignet. Im Rahmen des Arbeitspakets wurden zunächst alle Endstellen identifiziert und anschließend anhand betrieblicher, baulicher und technischer Kriterien bewertet.

An einem regulären Wochentag werden im Netz der DVG 83 unterschiedliche Endstellen besucht. Für die weitere Betrachtung wurden Endstellen anhand der folgenden Kriterien eingegrenzt:

- (1) Ausschluss von Endstellen, die nicht im DVG-Gebiet liegen
- (2) Ausschluss von Endstellen, die an einem regulären Wochentag (Dienstag, ID = 88) wenig frequentiert sind (weniger als 20x pro Tag)
- (3) Ausschluss von Endstellen, die keinen Platz für die Errichtung von Ladeinfrastruktur aufweisen

Abbildung 8 gibt einen Überblick über die Endstellen vor und nach der Eingrenzung in Schritt 2.

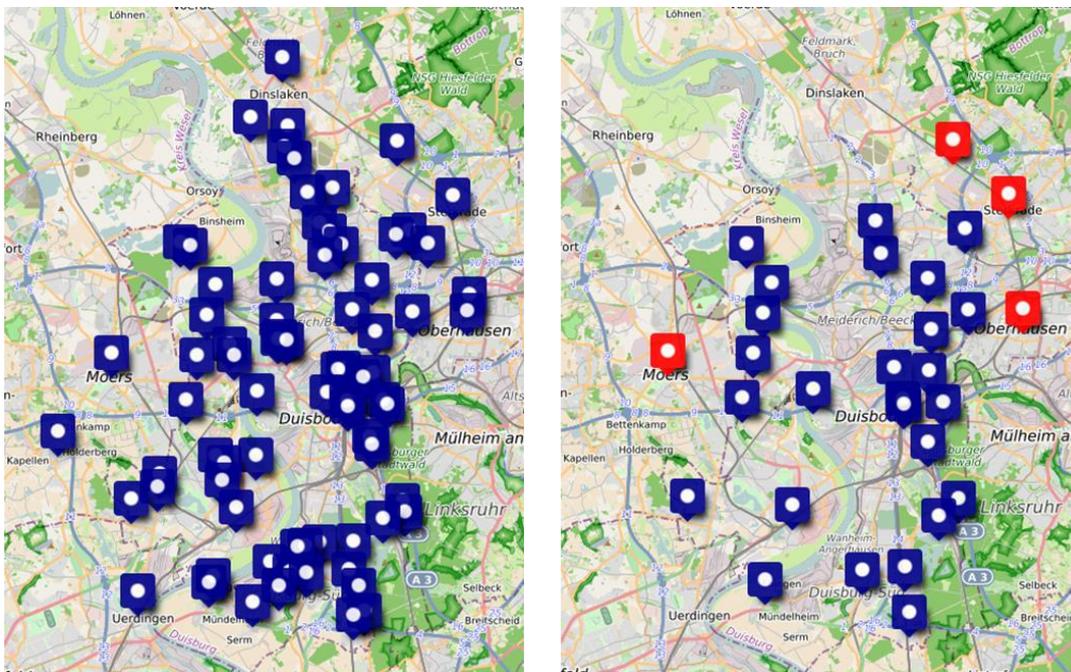


Abbildung 8: Alle Endstellen im DVG Bedienungsgebiet (links) und eingegrenzte Endstellen (rechts) für weitere Betrachtung (rote Markierungen weisen auf Endstellen außerhalb des DVG-Gebiets hin)

Die Bewertung hinsichtlich Kriterium (3) erfolgt auf Grundlage von Luftbildern, Vor-Ort-Aufnahmen und Aussagen der DVG. Eine weitere Unterteilung der identifizierten Endstellen erfolgte auf Grundlage der Platzsituation. An dieser Stelle wurde bewertet, ob zusätzlich zur Errichtung von Ladeinfrastruktur auch eine Überlager realisiert werden kann, welche bei Gelegenheitsladung durch unzureichende Standzeit (unzureichende Ladezeit) erforderlich sein kann. Ein zusätzliches Fahrzeug kann dabei eine Ladezeit in Höhe der Taktzeit generieren, wie Abbildung 9 verdeutlicht.

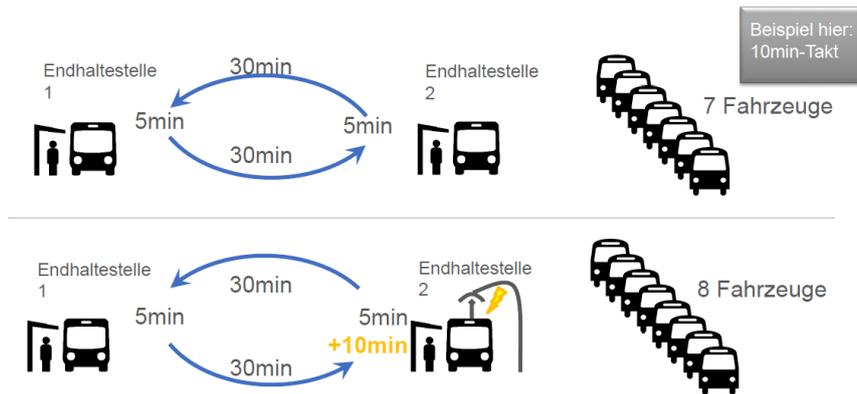


Abbildung 9: Generierung zusätzlicher Ladezeit durch Überlagerung

Die Auswertungsergebnisse für sämtliche nach Kriterium (2) eingegrenzten Endstellen sind im Anhang 1 dokumentiert. Tabelle 5 zeigt die Endstellen, welche nach Anwendung von Kriterium (3) für die weiteren Analysen in Betracht bleiben.

| Endstelle                 | Platz für Errichtung von Ladestation | Stellplatz für Überlagerung |
|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| Betriebshof Am Unkelstein | ✓                                    | ✓                           |
| Landschaftspark Nord      | ✓                                    | ✓                           |
| Duisburg Hbf Osteingang   | ✓                                    | bedingt geeignet            |
| Uni Nord                  | ✓                                    | ✓                           |
| Kaldenhausen Krölls       | ✓                                    | ✓                           |
| Ehinger Berg              | ✓                                    | bedingt geeignet            |
| Wolfssee                  | ✓                                    | ✓                           |
| Marxloh Pollmann          | ✓                                    | ✓                           |
| Rheindeich                | ✓                                    | bedingt geeignet            |
| Winkelhausen Bruchstraße  | ✓                                    | ✓                           |
| Sportpark                 | ✓                                    | ✓                           |
| Buschhauser Str           | ✓                                    | ✓                           |

Tabelle 5: Geeignete Endstellen im Bedienungsgebiet der DVG

Bei einigen Endstellen werden umfangreiche Umbaumaßnahmen nötig, insbesondere wenn eine zusätzliche Überlagerung zwecks Gewinn von Ladezeit ermöglicht werden soll. Solche wurden deshalb mit „bedingt geeignet“ gekennzeichnet, aber nicht aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Die Bewertung der Netzanschlussmöglichkeiten erfolgte – zusammen mit einer Grobschätzung der zu erwartenden Netzanschlusskosten je Ort – durch die Netze Duisburg GmbH, und zwar für die im empfohlenen Umstellungskonzept ausgewählten Ladeorte. Tabelle 6 zeigt die entsprechenden Verfügbarkeiten inklusive Schätzung der zu erwartenden Netzanschlusskosten und dem voraussichtlichen Ort des Anschlusspunkts. Für die anderen Ladeorte von Tabelle 5 wurden in den Kostenrechnungen Netzanschlusskosten von 26.000 € angesetzt. Der Baukos-

tenzuschuss in Duisburg, der noch zu den Netzanschlusskosten jeweils hinzukommt und anteilig für den vorgelagerten Netzausbau zu entrichten ist, beläuft sich auf 50 €/kVA. Schließlich ist noch eine Kundenstation (Transformator, Schalttechnik) nötig, welche bei einigen Ladegerätherstellern in den angebotenen Produkten enthalten ist. In dieser Studie wurden an dieser Stelle pauschal 20.000 € pro Ladeort angesetzt.

| Name                                       | benötigte Anschlussleistung (Annahme) | Generelle Verfügbarkeit Stromnetz   | Netzanschlusskosten (Schätzung Netze DU) | Ort des Anschlusspunkts            |
|--|---------------------------------------|---|--|------------------------------------|
| <b>DVG Bus Am Unkelstein (Betriebshof)</b> | bis zu 2 MVA zusätzlich               | Anschlussleistung von zusätzlich 2 MVA ohne zusätzliche baulichen Maßnahmen am öffentlichen Stromnetz möglich.<br>(Achtung: Bestehender Vertrag / derzeitige Kundenstation geht über 850 kVA. Genutzt werden nur 350 kVA. Bei Erweiterung um 2 MVA würde der Vertrag also über ca. 2,35 MVA gehen. Der Baukostenzuschuss müsste allerdings nur für die über die derzeitigen 850 kVA hinausgehende Leistung bezahlt werden, also für ca. 1,5 MVA.) | -  | -<br>(Anschluss bereits vorhanden) |
| <b>DVG Bus Am Unkelstein (Betriebshof)</b> | über 2 MVA zusätzlich                 | bei in Summe mehr als 2,35 MVA: Direkter Mittelspannungsanschluss aus dem Umspannwerk Innenhafen nötig (Verlegung von 2 Parallelkabeln, Trassenlänge ca. 3 km, inkl. 2 UW Schaltfelder)   | 400.000 €                                | Umspannwerk Innenhafen             |
| <b>Marxloh Pollmann</b>                    | 1.350 kVA                             | lastflusstechnische Einbindung möglich  | 16.000 €                                 | Friedrich Engel Str.               |
| <b>Duisburg Hbf Osteingang</b>             | 1.200 kVA                             | lastflusstechnische Einbindung möglich  | 25.000 €                                 | Neudorfer Str.                     |
| <b>Kaldenhäusen Krölls</b>                 | 900 kVA                               | lastflusstechnische Einbindung möglich  | 26.000 €                                 | Giesenfeldstraße                   |
| <b>Ehinger Berg</b>                        | 1.350 kVA                             | lastflusstechnische Einbindung möglich  | 30.000 €                                 | Ehinger Berg                       |
| <b>Rheindeich</b>                          | 600 kVA                               | lastflusstechnische Einbindung möglich  | 16.000 €                                 | Lilienthalstr.                     |
| <b>Landschaftspark Nord</b>                | 1.200 kVA                             | lastflusstechnische Einbindung möglich  | 42.000 €                                 | Neumühler Str.                     |
| <b>Uni Nord</b>                            | 600 kVA                               | lastflusstechnische Einbindung möglich  | 35.000 €                                 | Carl Benz Str.                     |
| <b>Winkelhausen Bruchstraße</b>            | 600 kVA                               | lastflusstechnische Einbindung möglich; relativ weit von Anschlusspkt. entfernt   | 100.000 €                                | Bruchstraße                        |

Tabelle 6: Netzanschlussmöglichkeiten und -kosten entsprechend Aussage von Netze Duisburg<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Zu beachten ist, dass die hier von Netze DU geschätzten Netzanschlusskosten noch keine Kundenanlagen (Transformator, Schalttechnik, etc.) enthalten.

Die Ladeinfrastruktur aller Endstellen würde also an das örtliche Mittelspannungsnetz angeschlossen werden, welches im Stadtgebiet gut ausgebaut und mindestens an jeder im Umstellungskonzept ausgewählten Endstelle verfügbar ist. Lediglich bei der Endstation am Landschaftspark Nord könnte es die alternative Möglichkeit geben, den Zugang zum Gleichspannungsnetz der Straßenbahn ohne große Maßnahmen zu nutzen.

Kapitel 1.5 beschreibt noch einmal die Netzanschlussmöglichkeiten für den Betriebshof Am Unkelstein. Die in dieser Studie angesetzten Aufwendungen für Ladegeräte werden in 1.6.4 beschrieben.

### 1.4 Wasserstoffbereitstellung

Brennstoffzellensysteme wandeln Wasserstoff in elektrische Energie und Wasser und sind somit lokal emissionsfrei. Die globale Emissionsfreiheit hängt von der Wasserstoffherzeugung ab. 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 wurde. Alternativ kann Wasserstoff auch über Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen werden. Nebenprodukte dieses Prozesses sind allerdings global wirksame Emissionen wie CO<sub>2</sub>, und zwar in vergleichbarer Menge wie bei einer Verbrennung des fossilen Energieträgers.

Die Wasserstoffherstellung mittels Elektrolyse kann sowohl in einer externen Anlage, als auch auf dem Betriebshof erfolgen, sofern ausreichende Flächen für die Errichtung der Anlage zur Verfügung stehen. Bei externer Erzeugung ist eine Anlieferung des Wasserstoffs im gasförmigen (CGH<sub>2</sub>-Anlieferung) oder flüssigen Zustand (LH<sub>2</sub>-Anlieferung) notwendig. 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 [1]. Bei dem Verbrauch eines Solobusses von 9 kg H<sub>2</sub> pro 100 km und einer täglichen Fahrleistung von 300 km entspricht dies dem Tagesbedarf von 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 im ÖPNV-Sektor bislang noch keinen Einzug gehalten und werden von Branchenexperten auch nicht favorisiert [2]. Abbildung 10 zeigt eine schematische Zeichnung einer Wasserstofftankstelle für zehn Busse mit LH<sub>2</sub>-Anlieferung. 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.

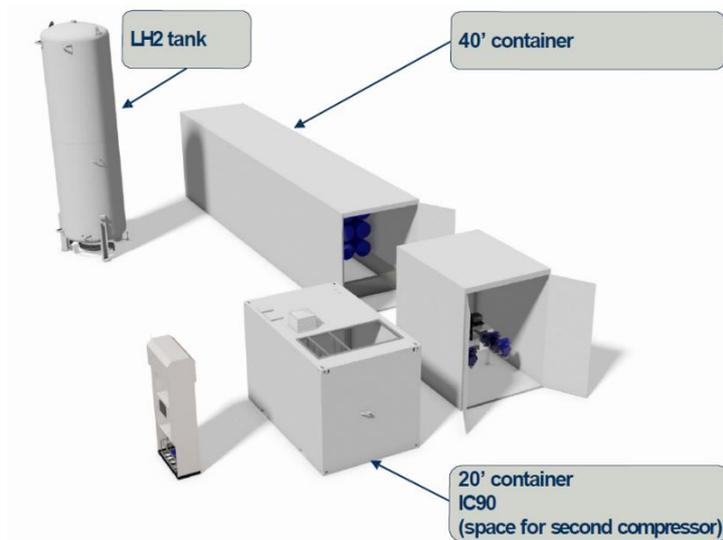


Abbildung 10: Schematische Darstellung einer Wasserstofftankstelle für 10 Busse [3]

Alternativ zur Anlieferung kann der Wasserstoff auch vor Ort („on-site“) erzeugt werden, wodurch der sehr energieintensive Verflüssigungsprozess entfällt. Der LH<sub>2</sub>-Tank in Abbildung 10 wird in diesem Fall nicht mehr benötigt. Ein Elektrolyseur wandelt stattdessen mittels Elektrizität Wasser in Wasserstoff um, welcher gasförmig gespeichert wird. Der Flächenbedarf für den Elektrolyseur und die weiteren Komponenten ist jedoch nicht unerheblich. Abbildung 11 verdeutlicht dies anhand einer Planungsgrundlage für eine Anlage zur täglichen Versorgung von rund 200 bis 250 Bussen.

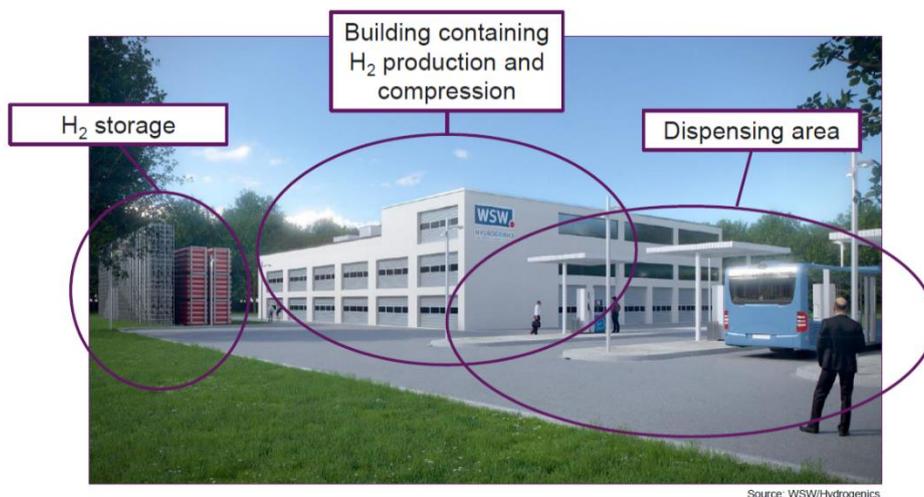


Abbildung 11: Wasserstofftankstelle mit Vor-Ort-Erzeugung mittels Elektrolyse für 200 bis 250 Busse [4]

## 1.5 Betriebshof Am Unkelstein

Eine Elektrifizierung des Busverkehrs erfordert Maßnahmen im Betriebshof. Zur Versorgung von Batterie- und Brennstoffzellenbussen muss Infrastruktur installiert werden, die sowohl in Bezug auf den Platzbedarf, als auch in Bezug auf den Netzanschluss neue Herausforderungen mit sich bringt. Weiterer Anpassungsbedarf ergibt sich für die Fahrzeughandhabung, die Betriebsabläufe sowie die Werkstatt. Aufgrund eines potentiellen Fahrzeugmehrbedarfs gilt es weiterhin zu prüfen, in welchem Umfang zusätzliche Stellfläche für die Abstellung von Fahrzeugen verfügbar ist.

Für die Belange der Studie wurde angenommen, dass alle Linien der DVG aus dem Betriebshof am Unkelstein bedient werden. Die Lage des Betriebshofes im Stadtgebiet wird in Abbildung 12 gezeigt. Der Betriebshof am Unkelstein befindet sich im Norden von Duisburg in der Nähe Autobahnkreuzes Duisburg. Auf dem Betriebshof erfolgt die Abstellung, Wartung und Reparatur von Bussen. Zur Aufnahme der lokalen Situation erfolgte eine Begehung des Betriebshofes, deren Ergebnisse im Folgenden ausgeführt sind.

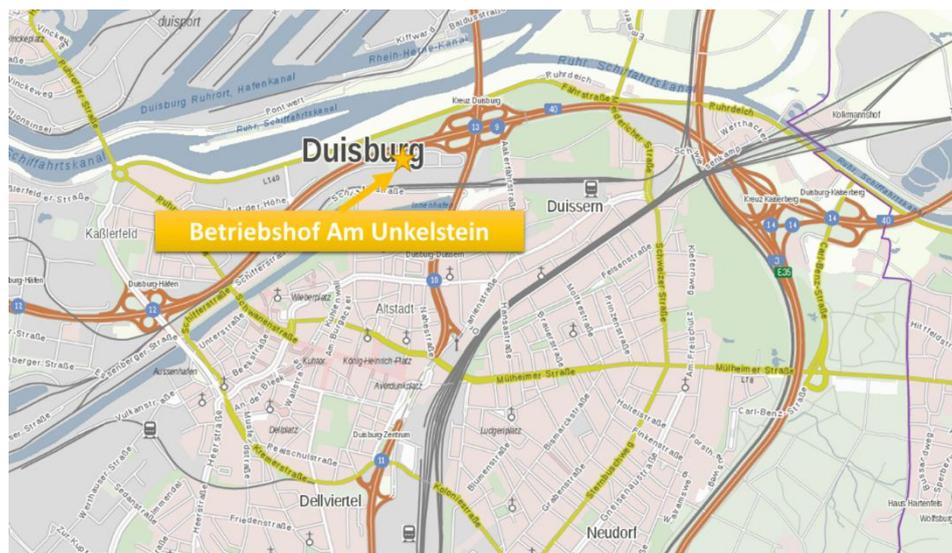


Abbildung 12: Lage des Betriebshofes im Stadtgebiet [5]

Alle Fahrzeuge werden derzeit in der Fahrzeughalle abgestellt, was hinsichtlich einer Elektrifizierung von Vorteil ist, da Temperaturen unterhalb von 0° C vermieden werden können. Die Fahrzeughalle bietet Platz für rund 180 Solobusse. Derzeit werden etwa 120 Solo- und Gelenkbusse auf dem Betriebshof abgestellt. Mit relativ geringem Aufwand können noch zusätzliche Plätze in der Abstellungshalle (ca. eine Reihe) realisiert werden. Weiterhin könnten vereinzelt weitere Plätze außen realisiert werden. Eine Eignung der vorhandenen Dachluken für die Umrüstung zum automatischen Entlüften von aus den Fahrzeugen austretendem Wasserstoff ist zu prüfen. Für die Abstellung der Elektrobusse ist die Eignung der derzeitigen Brandbekämpfungsanlage (Sprinkleranlage) zu prüfen und eventuell eine geeignete Umrüstung vorzunehmen.

Abbildung 13 gibt einen Überblick über das Betriebshofgelände. Unter dem Grundstück verläuft eine stillgelegte Ölpipeline, welche allerdings die Bebauung laut Aussage der DVG nicht einschränkt. Es wird davon ausgegangen, dass die im Norden gelegene, rot umrandete Fläche aufgrund der Nähe zur Autobahn nicht nutzbar ist. Der Betriebshof ist in Teilen von Flächen umgeben, die nutzbar gemacht werden können (siehe Abbildung 13). Dies umfasst eine Fläche von ca. 20 m x 25 m im Bereich der ehemaligen Gärtnerhütte, sowie einen Grünstreifen am Südrand mit einer Fläche von ca. 150 m x 8 m. Ein Mindestbegrünungsgebot des Betriebshofgeländes (Zwangsgrünflächen) besteht nach Aussage der DVG nicht.



Abbildung 13: Übersicht Betriebshof Am Unkelstein [5]

Beide Flächen eignen sich potentiell für die Errichtung einer Wasserstofftankstelle. Eine Wasserstoffherstellung vor Ort mittels Elektrolyseur ist nur bei Nutzarmachung von Teilen des PKW-Parkplatzes im Westen und des Bereichs um die ehemalige Gärtnerhütte möglich. Die Errichtung von Ladeinfrastruktur zum Nachladen von Batteriebussen auf dem Betriebshof unter Ausnutzung der beiden genannten Flächen ist grundsätzlich unproblematisch möglich. Allerdings muss die Tragfähigkeit des Hallendachs für Infrastruktur (z.B. Ladehauben, Pantographen, Kabel) geprüft werden.

Die Ortsnetzstation ist DVG-Eigentum (Kundeneigentum). Vertraglich nutzt die DVG zurzeit 850 kVA, nimmt in der Praxis derzeit aber nur ca. 350 kVA ab (Aussage Netze Duisburg). Laut Aussage von Netze Duisburg bietet die derzeitige Kabelleitung zur Ortsnetzstation noch Kapazität für zusätzliche 2 MVA. Ohne Umbaumaßnahmen am öffentlichen Stromnetz können also weitere 2 MVA entnommen werden (in Summe: 2,35 MVA). Werden größere Leistungen benötigt, so wird ein direkter Mittelspannungsanschluss aus dem Umspannwerk Innenhafen nötig. So wird beispielsweise für eine 8 MVA Netzanschlussleistung laut Netze Duisburg die Verlegung von 2 Parallelkabeln auf einer Trassenlänge von 3 km nötig. Die Schätzung der Netzanschlusskosten hierfür beläuft sich auf 550.000 € (ohne zusätzlich benötigte Kundenanlage). Der Baukostenzuschuss in Duisburg liegt bei 50 €/kVA und beläuft sich bei 8 MVA (Erweiterung um 7,15 MVA, da vertraglich bereits 850 kVA eingerichtet) auf 357.500 €.

Auf dem Betriebshof gibt es grundsätzlich keine Höhenbegrenzung, lediglich einzelne Spuren der Werkstatthallen sind potentiell problematisch beim Aufbocken der Elektrobusse, die oft höher sind als vergleichbare Dieselmotorenbusse (Höhen bis über 3,40 m möglich). In der Werkstatt sind einzelne einfache Dacharbeitsplätze vorhanden. Ein Kran zum Heben von Dachkomponenten der Busse wird voraussichtlich benötigt. Die Werkstatt verfügt schon heute über Dachfenster. Diese könnten potentiell so erweitert werden, dass sie sich bei Entweichen von Wasserstoff während der Wartung und Reparatur von Brennstoffzellenbussen automatisch öffnen.

Die zusammengefassten Ergebnisse der Begehung sind in Tabelle 7 aufgeführt.

| Betriebshof Am Unkelstein                            |   |
|--|---|
| <b>Aktuelle Fahrzeuganzahl</b>                       | etwa 120 Solo- und Gelenkbusse  |
| <b>Aufstellungsart Busse</b>                         | Hallenaufstellung   |
| <b>Generelle Platzsituation</b>                      | fast sämtlicher Platz zurzeit ausgenutzt, mit begrenztem Aufwand kann noch ca. eine Reihe in der Abstellungshalle nutzbar gemacht werden  |
| <b>Zusätzlich nutzbare Flächen</b>                   | Grünfläche um ehem. Gärtnerhütte (20 m x 25 m), Grünstreifen südl. der Fahrzeughalle zw. Betriebshofeinfahrt u. Ortsnetzstation (150m x 8 m)  |
| <b>Netzanschlussmöglichkeiten (Aussage Netze DU)</b> | Derzeitiger Vertrag erstreckt sich über 850 kVA. Zusätzlich sind 2 MW realisierbar mit dem bestehenden Netzanschluss. Erst darüber hinaus neuer Netzanschluss aus Umspannwerk Innenhafen nötig (z.B. 8 MW ca. 950.000 € für Netzanschluss und Baukostenzuschuss, zzgl. Kundenanlage). |
| <b>Fahrzeughöhenbegrenzung</b>                       | evtl. beim Anheben der Busse auf bestimmten Spuren in der Werkstatthalle, sonst kein Problem  |
| <b>Werkstatt</b>                                     | einzelne einfache Dacharbeitsplatz sind vorhanden; voraussichtlich Kran zum Heben von Komponenten auf dem Dach nötig  |

Tabelle 7: Ergebnisse der Betriebshofbegehung am Unkelstein

## 1.6 Kostenannahmen

Im Folgenden sind die Annahmen aufgeführt, welche zur Berechnung der Total Costs of Ownership (TCO) in der Wirtschaftlichkeitsanalyse herangezogen wurden. Die TCO entsprechen der Summe der diskontierten Zahlungsflüsse, die über dem Betrachtungszeitraum für die unterschiedlichen Buskonzepte anfallen (Barwert). Laut DVG wird der Kalkulationszinssatz im Jahr 2018 mit 2,5 % angesetzt. Mittelfristig (bis 2022) werde mit einer Erhöhung auf 3,5 % geplant. In dieser Studie wird ein Kalkulationszinssatz von 3 % ausgewählt. Der Betrachtungszeitraum wird zu zwölf Jahren gewählt.

### 1.6.1 Fahrzeugkosten

Die in der Studie betrachteten Fahrzeugkosten beziehen sich bei den Elektrobussen auf die Investitionskosten für das Basisfahrzeug ohne Batterie- bzw. Brennstoffzellensystem, aber in-

klusive elektrischem Antrieb. Die benötigten Batterie- bzw. Brennstoffzellensysteme und deren Ersatzbeschaffung werden in der Kostenanalyse gesondert berücksichtigt. Bei dem Dieselreferenzbus erfolgt diese Unterteilung nicht.

Tabelle 8 gibt einen Überblick über die angenommenen Investitions- und Instandhaltungskosten. Der Fahrzeuganschaffungspreis ist dabei ausschließlich von der Gefäßgröße abhängig.

| Bezeichnung | Gefäßgröße | Technologie         | Fahrzeugpreis in € | Instandhaltungskosten in €/km |
|-------------|------------|---------------------|--------------------|-------------------------------|
| DS1, DS2    | Solobus    | Depotlader          | 320.000            | 0,35                          |
| DG1, DG2    | Gelenkbus  | Depotlader          | 420.000            | 0,45                          |
| GS1, GS2    | Solobus    | Gelegenheitslader   | 320.000            | 0,38                          |
| GG1, GG2    | Gelenkbus  | Gelegenheitslader   | 420.000            | 0,48                          |
| BS1         | Solobus    | Brennstoffzellenbus | 320.000            | 0,39                          |
| BG1         | Gelenkbus  | Brennstoffzellenbus | 420.000            | 0,50                          |
| RDS         | Solobus    | Dieselreferenz      | 257.000            | 0,35                          |
| RDG         | Gelenkbus  | Dieselreferenz      | 355.000            | 0,45                          |

Tabelle 8: Kostenannahmen Fahrzeuge (inkl. Nachrichtentechnik, ohne Batterie-/Brennstoffzellensystem) und Instandhaltung (Angaben zu Dieselbus-Fahrzeugpreisen: DVG)

An dieser Stelle ist zu beachten, dass die Elektrobuspreise aufgrund der derzeitigen unausgeglichene Marktsituation, in der die Nachfrage das Angebot übersteigt, relativ hoch sind, und die Fahrzeugpreise noch Entwicklungskosten beinhalten, so dass es sich um konservative Annahmen handelt, die hier getroffen wurden. Mit dem Eintreten der großen europäischen Bushersteller EvoBus und MAN in den Elektrobusmarkt in 2019 und 2020 ist damit zu rechnen, dass eine gewisse Dynamik in diesen Markt kommt, die sich auch in kundenfreundlicheren Preisen bemerkbar machen kann.

Werkstattoverhead (laut DVG 0,06 €/km für 2015) und Fahrfertigmachung (laut DVG 0,11 €/km für 2015) werden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Die angegebenen Instandhaltungskosten fallen in den nachfolgenden Berechnungen für jeden zurückgelegten Kilometer an (Leer- und Nutzkilometer). Zum Vergleich: Die Wartungskosten pro Nutzkilometer lagen laut DVG im Jahr 2015 bei 0,51 €/km (über Flottenmix).

Bezüglich der Instandhaltungskosten der Elektrobusssysteme gibt es bislang noch keine belastbaren Aussagen. An dieser Stelle ist zunächst zu beachten, dass in dieser Studie der Austausch von Batterie- und Brennstoffzellensystemen nicht als Instandhaltungskosten angesetzt wird, sondern der Austauschbedarf separat linien- und konzeptspezifisch ermittelt wird und unter „Batterie- und Brennstoffzellenkosten“ fällt (siehe Kapitel 1.6.2). Der elektrische Antrieb selbst bietet zwar grundsätzlich das Potential eines wartungsärmeren Betriebs als konventionelle Antriebe, jedoch resultiert auch ein nicht unerheblicher Teil der Wartungs- und Instandhaltungskosten aus Komponenten, die nicht direkt dem Antrieb zugeordnet sind (Türantriebe etc.). Weiterhin kommen mit dem Koppelsystem für die Ladung neue Komponenten in die Fahrzeuge, die einen regelmäßigen Wartungsbedarf haben. Aus diesem Grund wurden die

Wartungskosten konservativ angesetzt. Für Batteriebusse mit Depotladung entsprechen sie dem Niveau der Dieselbusse. Durch die starke Beanspruchung der Koppelsysteme bei den Gelegenheitsladern wurde mit einem um 3 ct/km erhöhten Instandhaltungsaufwand gerechnet. Die Instandhaltungskosten für Brennstoffzellenbusse wurden mit einem Aufschlag von 10 % gegenüber den aktuellen Instandhaltungskosten der Dieselbusse abgeschätzt. Sie liegen somit über denen der anderen Fahrzeugtypen und berücksichtigen, dass die Systeme insgesamt komplizierter und somit auch instandhaltungsintensiver sind.

Für die Dieselbusse wird nach dem zwölfjährigen Betrachtungszeitraum ein Restwert von 10 % unterstellt. Für die Elektrobusse wurde eine Nutzungsdauer von 15 Jahren hinterlegt mit einem Restwert von 4 % (vom Fahrzeugpreis ohne Batterie), was einen Restwert von 23,2 % am Ende des Betrachtungszeitraums ergibt. Die höhere Annahme der Lebensdauer begründet sich aus dem vibrationsarmen Antrieb und wird beispielsweise auch bei Oberleitungsbussen angewandt. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Entwicklung der Restwerte während des Betrachtungszeitraums elektrisch angetriebene Fahrzeuge gegenüber Dieselfahrzeugen begünstigen wird.

### 1.6.2 Batterie- und Brennstoffzellenkosten

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

Die Anforderungen an Batteriesysteme unterscheiden sich anhand der favorisierten Nutzung. Bei Batterien für Depotlader steht vor allem die hohe Energiedichte im Vordergrund. Sie weisen daher geringere spezifische Kosten auf als Batteriesysteme für Gelegenheitslader, welche eher auf hohe Ladeleistungen optimiert sind. Aus diesem Grund werden in der Studie zwei Kostenannahmen für Batteriesysteme definiert, welche in Tabelle 9 dargestellt sind. Bei Batterien muss hinsichtlich ihrer Lebensdauer zwischen zyklischer und kalendarischer Alterung unterschieden werden. Die zyklische Alterung wird durch die Nutzung (Laden/ Entladen) hervorgerufen und ist als äquivalente Vollzyklen (Anzahl möglicher Kapazitätsdurchsätze bezogen auf Anfangskapazität) angegeben. Der angegebene Wert schätzt die möglichen Kapazitätsdurchsätze konservativ nach unten ab. Bei der Kostenrechnung erfolgt auf dieser Grundlage eine Bestimmung der benötigten Ersatzbeschaffungen individuell für jede Linie (bzw. für jedes Linienbündel) und jedes Fahrzeugkonzept. Der zweite lebensdauerbegrenzende Effekt ist die kalendarische Alterung. Auch ohne Benutzung altert die Batterie. Die Obergrenze für die Batterielebensdauer ist hier zu zwölf Jahren definiert. Dies bedeutet, dass die Batterie ausgetauscht wird, je nachdem, was jeweils früher eintritt: das Erreichen der zyklischen oder der kalendarischen Lebensdauer.

| Batterietyp       | Preis in €/kWh | Lebensdauer zyklisch in Vollzyklen | Lebensdauer kalendarisch in Jahren |
|-------------------|----------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Depotlader        | 750            | 2.500                              | 12                                 |
| Gelegenheitslader | 1000           | 5.000                              | 12                                 |

Tabelle 9: Kostenannahmen für Batteriesysteme

Für die Brennstoffzellensysteme werden die 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 20.000 Betriebsstunden zu erzielen. Für die Studie wurden mit Blick auf die nahe Zukunft 25.000 h angenommen. Wie auch für die Batteriesysteme erfolgt die Bestimmung von Austauschintervallen im Rahmen der Studie anhand der tatsächlichen Belastung (hier: Betriebsstunden).

Um den gerade stattfindenden Markthochlauf bei Elektrobussen und samt der Leitmärkte entsprechend zu berücksichtigen, wurde sowohl für Batteriesysteme als auch für Brennstoffzellensysteme ein linearer Preisverfall von 30 % im 12-jährigen Betrachtungszeitraum angenommen. Ersatzbeschaffungen erfolgen ebenfalls zu diesen reduzierten Kostensätzen. Ersatzbatterien, die zum Ende des Betrachtungszeitraums noch funktionsfähig sind, werden mit ihrem Restwert in der Kostenrechnung berücksichtigt.

### 1.6.3 Energiekosten

Im Rahmen der Studie werden vier unterschiedliche Energieträger betrachtet. Dieseldieselfkraftstoff dient dabei als Referenz bezüglich Kosten und Emissionen. Die Elektrobussysteme werden mit Ökostrom aus erneuerbaren Energien bzw. „grünem Wasserstoff“, welcher mittels Elektrolyse aus Ökostrom hergestellt wird, betrieben. Die für die Studie angenommenen Werte sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Sie basieren auf Angaben der DVG und Literaturwerten, beispielsweise aus dem Projekt „NewBusFuel“ [6]. Für die zukünftige Preisentwicklung wurden basierend auf den zurückliegenden Preissteigerungen seit dem Jahr 2000, jährliche Zunahmen definiert, welche ebenfalls in Tabelle 10 und in Abbildung 14 dargestellt sind. Die Anfang 2017 beschlossene Reduzierung der Stromsteuer für Elektrobusse auf den Satz des Schienenverkehrs und der Oberleitungsbusse (11,42 €/MWh) wurde berücksichtigt, sodass sich der Strompreis zu 0,17 €/kWh ergibt.

| Energieträger                 | Preis (in 2017) | Jährliche Preissteigerung |
|-------------------------------|-----------------|---------------------------|
| Diesel <sup>3</sup>           | 0,91 €/l        | 2,24 ct/l                 |
| Strom                         | 0,17 €/kWh      | 0,67 ct/kWh               |
| Wasserstoff                   | 11,00 €/kg      | 0,30 €/kg                 |
| Heizöl für fossilen Zuheizung | 0,60 €/l        | 1,54 ct/l                 |

<sup>3</sup> Dieselpreis in der Wirtschaftsplanung der DVG für 2018: 0,93 €/l

Tabelle 10: Energiekosten und Preisentwicklung

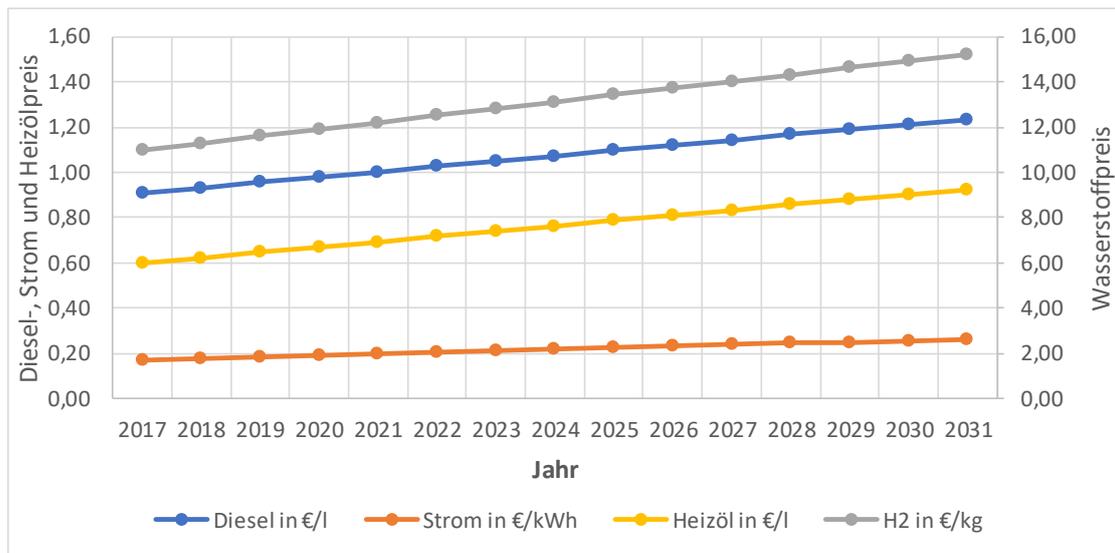


Abbildung 14: Angenommene Preisentwicklung für unterschiedliche Energieträger<sup>4</sup>

Die Kosten für die Erzeugung von „grünem Wasserstoff“ hängen in hohem Maße vom Strompreis ab. Bei der Herstellung von 1 kg H<sub>2</sub> werden rund 58 kWh elektrische Energie benötigt [2]. Im Rahmen des Projekts „NewBusFuel“ wurden die resultierenden Wasserstoffkosten für verschiedene Anlagengrößen und Strompreise ermittelt [6]. Die Kostenanteile sind in Abbildung 15 getrennt nach CAPEX (Abschreibung für die Erzeugungsanlage und Tankstelle) sowie OPEX (laufende Kosten für den Betrieb der Anlage) angegeben.

Bei einem aktuellen Strompreis von 15 bis 18 ct/kWh (ohne reduzierte Stromsteuer) liegen die Wasserstoffkosten je nach Anlagengröße im Bereich von 11 €/kg H<sub>2</sub> (Anlage für den täglichen Bedarf von rund 222 Solobussen) bis 15 €/kg H<sub>2</sub> (Anlage für rund 37 Solobusse). Sofern der Wasserstoff in externen Anlagen erzeugt werden würde, kommen weiterhin die Kosten für eine Verflüssigung und Anlieferung des Wasserstoffs hinzu. Für eine erste Näherung im Rahmen der Studie werden die Wasserstoffkosten nach unten abgeschätzt und zu 11 €/kg H<sub>2</sub> angenommen.

<sup>4</sup> Die im Koalitionsvertrag zwischen CDU/CSU und SPD vom 07.02.2018 beschlossene Abschaffung bzw. Reduktion der EEG-Umlage von Strom für Elektrobusse auf das Niveau der EEG-Umlage von Strom für Schienenbahnen (vgl. Zeile 3557) ist in dieser Studie noch nicht berücksichtigt, würde aber der Wirtschaftlichkeit von Elektrobussen entgegenkommen.

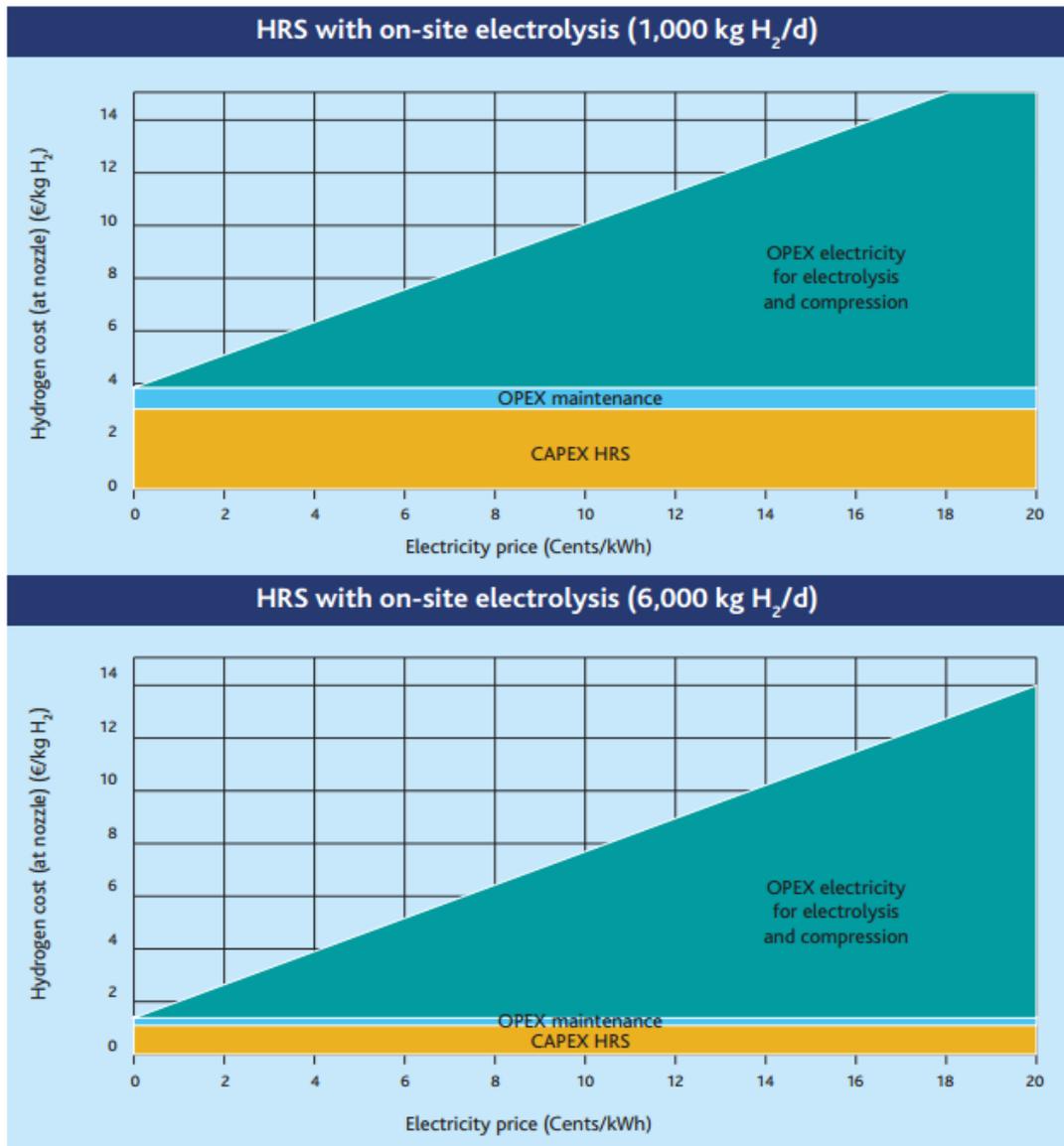


Abbildung 15: Spezifische Kosten für die Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyse basierend auf Berechnungen im Projekt NewBusFuel [6]

#### 1.6.4 Infrastrukturkosten für Batteriebusse

Ladeinfrastruktur für Batteriebusse wird in verschiedensten Leistungsklassen angeboten. Dabei lässt sich grundsätzlich zwischen Ladegeräten für den Betriebshof und Schnellladegeräten für Gelegenheitslader unterscheiden. In der Studie werden für Schnellladegeräte die Leistungsebenen 300 kW und 450 kW betrachtet. Auch für Depotlader ist die Ladeleistung relevant, da die Fahrzeuge nicht nur über Nacht geladen werden, sondern auch tagsüber zwischen zwei Einsätzen, so dass eine höhere Ladeleistung die Ladezeit reduziert und somit auch bei Depotladern die Fahrzeugverfügbarkeit erhöht. Für Depotlader wird daher eine Ladeleistung von 120 kW angenommen, was der derzeit bei Stecksystemen (CCS-Stecker) maximalen kontinuierlich übertragbaren Ladeleistung entspricht. Gelegenheitslader hingegen laden tagsüber an Schnellladegeräten und benötigen daher im Depot weniger Ladeleistung, so dass hier 80 kW

angesetzt werden. Aus den aktuell am Markt üblichen Preisen wurden die in Tabelle 11 aufgeführten Kostenannahmen abgeleitet.

| Kategorie      | Leistung in kW | Anschaffungskosten in € | Instandhaltungskosten in € / Jahr |
|----------------|----------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Standardladung | 80             | 64.000                  | 500                               |
| Standardladung | 120            | 96.000                  | 500                               |
| Schnellladung  | 300            | 221.100                 | 3000                              |
| Schnellladung  | 450            | 331.650                 | 3000                              |

Tabelle 11: Kostenannahmen Ladeinfrastruktur Batteriebusse

Sowohl für Depotlader als auch für Gelegenheitslader wird ein vollautomatisches Ladesystem mit einem Pantographen auf dem Fahrzeug angenommen. Die definierten Kostenannahmen umfassen die komplette Hardware, deren Errichtung und Inbetriebnahme einer Ladestation an den Endstellen bzw. im Busdepot.

### 1.6.5 Kosten für zusätzliche Fahrzeit

Die begrenzten Reichweiten der Elektrobussysteme erfordern unter Umständen Anpassungen an der Betriebsplanung, sodass zusätzliche Fahrzeuge benötigt werden. Resultierend daraus kann sich ein erhöhter Bedarf an Leerfahrten ergeben. Ein erheblicher Kostenfaktor ist dabei die zusätzliche Fahrzeit, die aus den Anpassungen resultiert. Die DVG bezifferte die Fahrerkosten in 2016 auf 30,06 €/h. Der Fahrer-Tarif „TV-N NRW“ hatte in der vergangenen Zeit eine mittlere jährliche Steigerung von 2,38 %. Über einen Zeitraum von 12 Jahren (Betrachtungszeitraum) angesetzt ergibt sich ein Verlauf für den Stundensatz von etwa 30 €/h auf etwa 39,80 €/h. Der in dieser Studie angesetzte Stundensatz wurde zum Mittelwert, also 34,90 €/h, angenommen. Für aufgeteilte Umläufe, welche am Busdepot beginnen und enden, wird weiterhin eine Rüstzeit von 10 min berücksichtigt.

## 1.7 Änderungen am Nahverkehrsplan seit Studiendurchführung

Die nachfolgenden Ergänzungen zum 3. Nahverkehrsplan der Stadt Duisburg (Drucksache-Nr. 17-0444) wurden zum Ende dieser Studie beschlossen (Drucksache-Nr. 17-1281) und fanden somit keine Berücksichtigung. Ihr Einfluss auf die Auslegung wird allerdings an den betreffenden Stellen in den nachfolgenden Kapiteln diskutiert.

### **Linie SB40 (Ref.-Nr. 40):**

Die Ausweitung des Angebots auf einen 30-Minuten-Takt in den Hauptverkehrszeiten kann zu einem Fahrzeugmehrbedarf führen. Außerdem wird sich dadurch und durch den zusätzlich hinzukommenden Liniendienst an Samstagen die Fahrleistung der Linie erhöhen. An dieser Stelle ist noch zu beachten, dass Linie SB40 streckenweise ein Konkurrenzprodukt zur Straßenbahnlinie 903 ist, und dass auf dieser zukünftig Bahnen mit größerer Fahrgastkapazität

eingesetzt werden sollen, so dass eine Neubewertung der Linie SB40 in absehbarer Zukunft geplant ist. In dessen Zuge sollte auch eine Neubewertung hinsichtlich des Einsatzes von Elektrobussen vorgenommen werden.

**Linie Mitte 1 (Ref.-Nr. 930/931):**

Unter Beibehaltung der gegebenen Taktzeiten soll die Linie verlängert werden, um weitere Stadteile direkt an die Innenstadt anzubinden. Dies wird zu verlängerten Fahrzeiten und höherer Kilometerleistung der Linie führen und könnte dementsprechend zu einem erhöhten Fahrzeugbedarf und betrieblichen Umstellungen insgesamt führen. Entsprechend könnte sich die Empfehlung für die Elektrifizierung ändern.

**Linie Süd 1 (Ref.-Nr. 941):**

Die Linie soll in einem 60-Minuten-Takt verlängert werden. Dies wird zu verlängerten Fahrzeiten und höherer Kilometerleistung führen und könnte dementsprechend zu einem erhöhten Fahrzeugbedarf und betrieblichen Umstellungen insgesamt führen. Entsprechend könnte sich die Empfehlung für die Elektrifizierung ändern.

## 2. Technische und betriebliche Analyse (Arbeitspaket 2)

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

Im Gegensatz zu Dieselbussen gibt es bei Elektrobussen wesentliche Rahmenbedingungen, die die technische Machbarkeit einer Elektrifizierung und den Betrieb erheblich beeinflussen. Für Batteriebusse mit Depotladung ist hier vor allem die begrenzte Batteriekapazität zu nennen, welche zur Folge hat, dass Dieselbusumläufe mit hohen Fahrleistungen (z.B. Linie Süd 2 / Ref.-Mr. 942 mit über 300 km pro Tag) nicht ohne zusätzliche Fahrzeuge darstellbar sind. Bei Batteriebussen mit Gelegenheitsladung ist nicht so sehr die Batteriekapazität, sondern vielmehr die benötigte Ladezeit das wesentliche Kriterium. Umläufe müssen in regelmäßigen Abständen ausreichend Zeit an Endstellen mit Ladestation aufweisen, sodass zuvor verbrauchte Energie wieder nachgeladen werden kann. Bei Brennstoffzellenbussen sind die betrieblichen Konsequenzen aufgrund der höheren Reichweite deutlich geringer. Abhängig von den Einsatzbedingungen kann aber auch eine Umgestaltung der Umläufe und eine Begrenzung der Fahrleistung notwendig werden. Die genannten Rahmenbedingungen wurden in der Studie detailliert für jede Linie untersucht. Die dabei genutzte Methodik und die Kriterien sind nachfolgend erläutert.

### 2.1 Methodik und Kriterien

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

Weitere Kriterien müssen für Gelegenheitslader berücksichtigt werden. Verspätungen auf der Linie beeinflussen direkt die zur Verfügung stehende Ladezeit, wenn Anschlussfahrten ohne Verspätung begonnen werden sollen. Bei der Bewertung der Gelegenheitslader wurden daher Verspätungen gemäß Kapitel 1.1 für alle Linien berücksichtigt.

Ein weiteres direktes Kriterium für die betriebliche Machbarkeit von Gelegenheitsladern wird durch die Möglichkeit bedingt, dass Ladeinfrastruktur an den Endstellen ausfallen kann. Für die Studie wurde eine minimale Autonomiezeit von anderthalb Stunden definiert, während

welcher der Linienbetrieb auch bei Ausfall einer Ladestation aufrechterhalten werden kann. In dieser Zeit muss im Realbetrieb dann eine Reparatur erfolgen oder die betroffenen Busse ersetzt werden. Durch diese garantierte Autonomiezeit fahren Batteriebusse mit Gelegenheitsladung also immer mit einer Energiereserve. Sie können damit auch verkürzte Stillstandzeiten oder leicht geänderte Linienwege kompensieren. Wichtig dabei ist, dass der Energiebedarf im Mittel der Batterie wieder zugeführt wird und die Untergrenze des Ladezustands der Batterie nicht unterschritten wird.

Wie in Kapitel 1.1 erwähnt wird in der linienweisen Analyse die gesamte Fahrleistung einer Linie für die jeweils anspruchsvollste Tagesart betrachtet. Für die regulären Linien ist dies der Dienstag (Tagesart-ID 88) und für die Nachtlinien der Samstag (Tagesart-ID 6).

Die Energiebedarfsbestimmung des Traktionssystems erfolgte durch Simulation separat für jede Technologie und die ausgewählten Referenzlinien. Der ermittelte spezifische Bedarf wurde anschließend auf die anderen Linien übertragen. Höhenunterschiede zwischen der Start- und Endstelle wurden dabei berücksichtigt.

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

## 2.2 Besonderheiten einzelner Linien

Für zwei Linien sind laut Betriebsdaten verschiedene Gefäßgrößen, d.h. sowohl Umläufe für Solobusse, als auch Umläufe für Gelenkbusse, vorgesehen. Linie 933 ist mit 3 Solobus-Umläufen und 6 Gelenkbus-Umläufen geplant. In diesem Fall wurde die technische Machbarkeit der Fahrtenanteile für Gelenk- und Solobusse einzeln geprüft (im Folgenden: „9331“ → Solobus und „9332“ → Gelenkbus). Linie 920 wird als reine Gelenkbuslinie betrachtet, da zu den 9 Gelenkbus-Umläufen nur ein Solobus-Umlauf hinzukommt.

Der Nahverkehrsplan beinhaltet gewisse Linien, die grundsätzlich ein hohes Synergiepotential aufweisen. Die Linien 905 und 906 bilden die Ringlinie Nord 1, die in verschiedene Richtungen betrieben wird. Die Fahrzeuge können grundsätzlich an der Endstelle die Richtung wechseln, sodass Fahrzeuge ohne lange Leerfahrten auf beiden Linien eingesetzt werden können (im Folgenden „905906“).

Linien 909 und 910 bilden die Ringlinie Nord 3, auf der alle Fahrzeuge ebenfalls auf beiden Richtungen eingesetzt werden können (im Folgenden „909910“). Darüber hinaus kann Ladeinfrastruktur an der Endstelle in bestimmtem Umfang von beiden Richtungen der Linie geteilt werden.

Linien 930 und 931 bilden die Ringlinie Mitte 1 und können sich potentiell ebenfalls Ladeinfrastruktur und Fahrzeuge teilen (im Folgenden „930931“). Weiterhin ist bei dieser Ringlinie zu beachten, dass die Endstelle, also die Haltestelle für das Ein- und Aussetzen der Fahrzeuge auf der Ringlinie, nämlich Schnabelhuck, in Kapitel 1.3 als „nicht geeignet“ zur Nachladung von Elektrobussen bewertet worden ist. Allerdings kann es laut DVG in Zukunft dazu kommen, dass eine andere Haltestelle auf der Linie als Endstelle festgelegt werden wird. Aus diesem Grund wird in den folgenden Untersuchungen der Einsatz von Gelegenheitsladern nicht ausgeschlossen.

Das Linienpaar 916 und 917 (Linie West 1) sowie das Linienpaar 922 und 923 (Linie West 2) haben jeweils eine ähnliche Wegführung. Deswegen können Fahrzeuge mit moderatem Aufwand jeweils durch beide Linien genutzt werden (im Folgenden „916917“ bzw. „922923“).

Die Nachtlinien 801, 804 und 805 werden durch Solobusse bedient und haben eine gemeinsame Endstelle. Die Nachtlinien 802, 803 und 806 werden durch Gelenkbusse bedient und haben ebenfalls eine gemeinsame Endstelle. Für alle diese Fälle wurde die Fahrzeuganzahl jeweils für alle Konzepte sowohl linienscharf, als auch unter Berücksichtigung von Synergieeffekten (im Folgenden „801804805“ bzw. „802803806“) bestimmt.

### 2.3 Detaillierte Ergebnisse für Linie 934

Die Definition von unterschiedlichen Fahrzeugtypen, Nebenverbraucher-Konfigurationen (NV-x) und Szenarien führt zu einem sehr umfassenden Ergebnisraum. Für jede Linie wurden alle Permutationen analysiert und bewertet. Abbildung 16 veranschaulicht den Zusammenhang der Ergebnisse. In der folgenden Diskussion sind die Resultate der Linie 934 genauer erläutert.

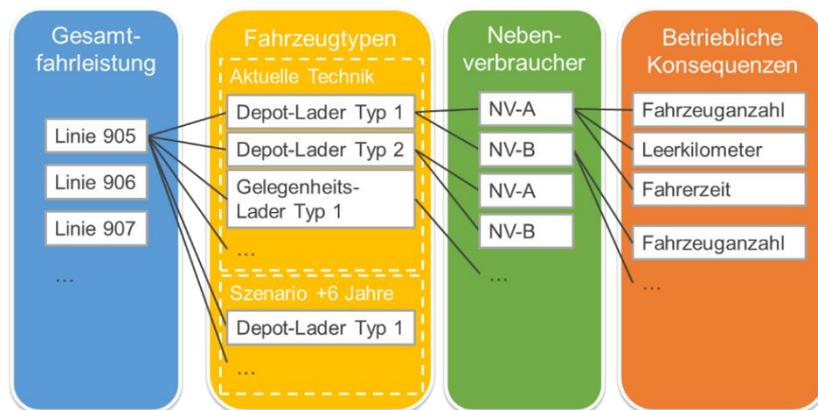


Abbildung 16: Zusammenhang der Ergebnisse für alle Linien mit den unterschiedlichen Szenarien, Fahrzeugtypen und NV-Konfigurationen

Linie 934 kann mit sechs Diesलगelenkbussen betrieben werden. Eine Besonderheit von Linie 934 ist, dass eine der Endstellen in direkter Nähe zum Betriebshof liegt („Betriebshof Am Unkelstein“). Abbildung 17 zeigt die Dieselumläufe der Linie. Fahrten im Liniendienst sind dunkelblau, Leerfahrten hellblau, Pufferzeiten für den Ausgleich potentieller Verspätungen rot und Stillstandzeiten an den Endstellen grün gekennzeichnet. Demnach wird Linie 934 konstant über den gesamten Tag betrieben, und es gibt keine längeren Pausen im Betriebshof. Die Umlauflängen sind deswegen vergleichsweise lang.

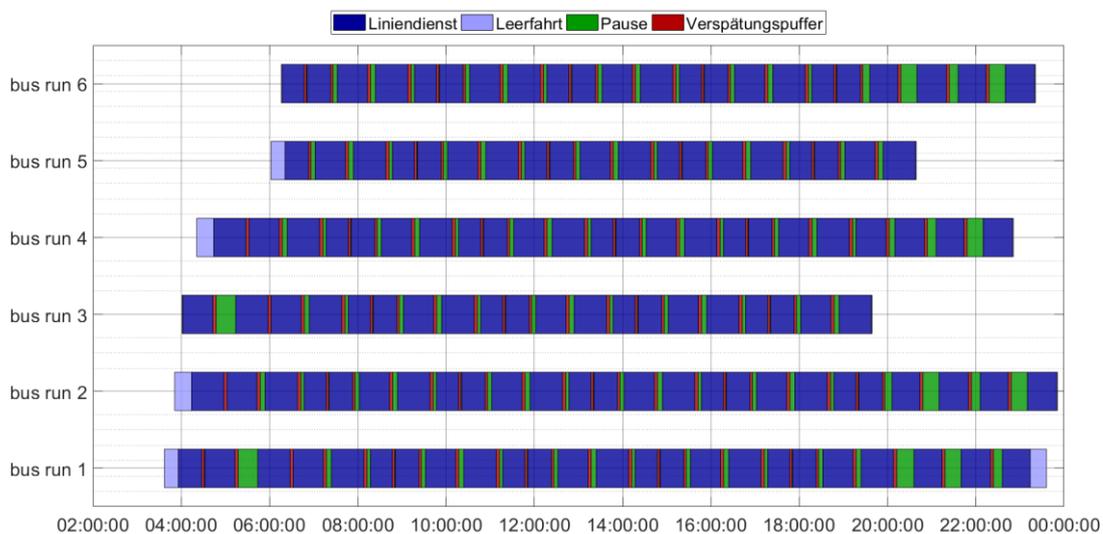


Abbildung 17: Dieselumläufe der Linie 934

Eine Elektrifizierung mit ausschließlicher Depotladung ist aufgrund der täglichen Fahrleistung nicht ohne Weiteres möglich. Für die Bewertung der betrieblichen Konsequenzen wurden daher die beiden unterschiedlichen Depotladertypen sowie an die unterschiedlichen NV-Konfigurationen angepasste Umläufe erstellt und bewertet.

Bei Verwendung des Depotlader Typ 1 mit elektrischem Heizer (NV-A) braucht es neun Busse, um den Liniendienst über das ganze Jahr abzudecken (Abbildung 18). Durch den el. Heizer ist

der Verbrauch im Winter besonders hoch und die Busse müssen häufig im Betriebshof nachladen. In der Abbildung sind Phasen, die zum Nachladen im Betriebshof genutzt werden, orange markiert. Eine Endstelle der Linie 934, Betriebshof Am Unkelstein, liegt in unmittelbarer Nähe zum Betriebshof, sodass die Fahrten zum Betriebshof relativ kurz sind. Trotzdem führen die Nachladephasen dazu, dass der Fahrzeugbedarf deutlich steigt. Bereits an dieser Stelle ist klar, dass Linie 934 zwar mit Depotlader Typ 1 mit el. Heizung darstellbar ist, der Fahrzeugmehrbedarf diese Lösung allerdings betrieblich unattraktiv macht. Eine Erhöhung der Batteriekapazität des Fahrzeugs durch Verwendung des Depotlader Typ 2 mit el. Heizer schafft auch keine Abhilfe. Der Grund hierfür ist, dass die verbrauchte Energie der Busse nachgeladen werden muss und die Ladephasen nicht geeignet verschoben werden können.

Durch den hohen Verbrauch für die elektrische Heizung haben wenige Tage im Winter hohen Einfluss auf den Fahrzeugbedarf des Konzepts. Deshalb kann es sehr sinnvoll sein, auf ein hybrides Heizkonzept zu setzen und einen fossilen Zuheizler zu verwenden, der bei sehr tiefen Temperaturen die Beheizung des Busses übernimmt. Der fossile Zuheizler setzt bei sehr niedrigen Außentemperaturen ein, in moderaten Temperaturbereichen wird der Bus hingegen elektrisch temperiert/klimatisiert. Dadurch entstehen nur an Tagen mit sehr niedrigen Temperaturen Emissionen durch den Zuheizler.

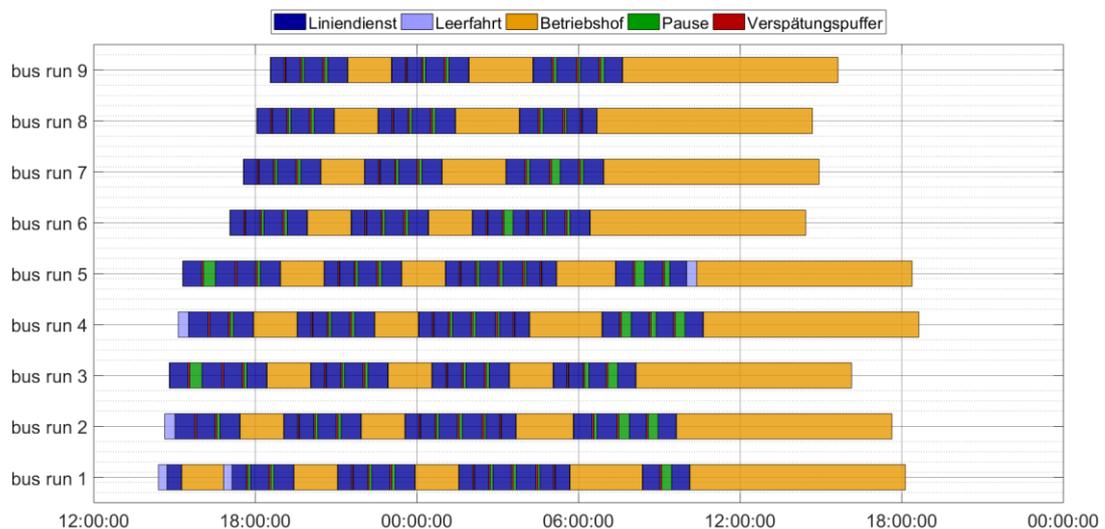


Abbildung 18: Linie 934 – Umläufe für Depotlader Typ 1 und 2 mit el. Heizer (NV-Konfiguration A)

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigt die Umläufe für Depotlader Typ 1 und Typ 2 mit hybridem Heizkonzept unter Verwendung eines fossilen Zuheizlers (NV-B „Hybridheizung“). In beiden Fällen kann der Fahrzeugbedarf zur Erfüllung des Liniendienstes von zehn auf acht Busse reduziert werden. Aus betrieblicher Sicht ist die Verwendung eines fossilen Zuheizlers bei Depotladern für Linie 934 sehr attraktiv. Bei Verwendung des Depotladers Typ 2 kann die Anzahl der Nachladephasen im Betriebshof reduziert werden. Somit können auch Leerkilometer reduziert werden. Umläufe für Depotlader Typ 1 und 2 mit el. Heizer (NV-Konfiguration A)

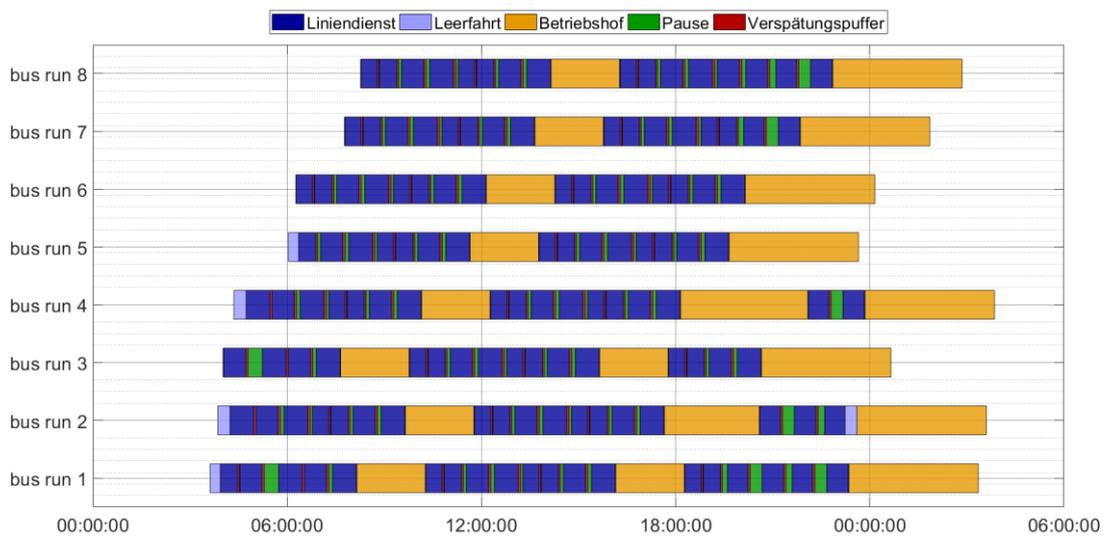


Abbildung 19: Linie 934 – Umläufe für Depotlader Typ 1 mit hybridem Heizkonzept (NV-Konfiguration B)

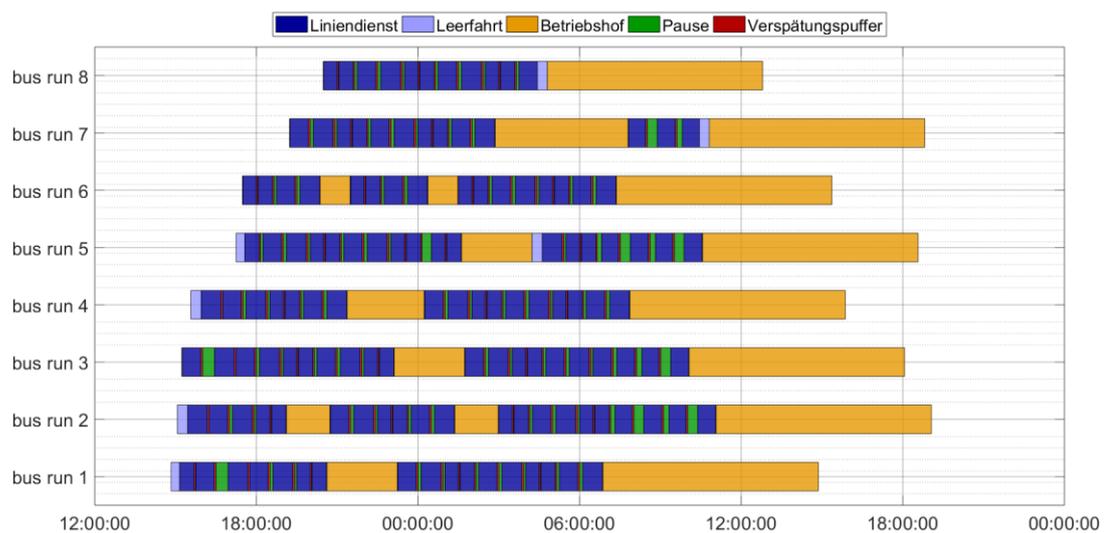


Abbildung 20: Linie 934 – Umläufe für Depotlader Typ 2 mit hybridem Heizkonzept (NV-Konfiguration B)

Insgesamt ist Linie 934 zunächst für klassische Depotlader-Konzepte mit ihren geringen Ladeleistungen nur mäßig geeignet, da die Linie konstant über den Tag betrieben wird und es deswegen keine „natürlichen“ Zeiten gibt, in denen die Batteriebusse nachgeladen werden könnten, sondern diese Zeiten erst auf Kosten der Umlaufplaneffizienz geschaffen werden müssten.

Abbildung 21 zeigt die Umläufe für Gelegenheitslader Typ 1 und 2 unter Verwendung eines fossilen Zuheizers (NV-B). In den gelben Phasen wird der Bus an einer Ladestation mit einer Ladeleistung von 300 kW (Typ 1) bzw. 450 kW (Typ 2) nachgeladen. Typ 1 und Typ 2 verwenden die gleichen Einsatzpläne, eine höhere Ladeleistung bringt in diesem Fall also keine betrieblichen Verbesserungen mit sich (keine Fahrzeuge einsparbar). Am Ende des Tages werden

die Busse in der Abstellung im Betriebshof nachgeladen. Hierbei ist eine geringere Ladeleistung ausreichend, weshalb diese Phasen orange markiert sind. In den Dieselumläufen ist zum Nachladen an der Endstelle Betriebshof Am Unkelstein keine ausreichende Stillstandzeit zum Nachladen der Elektrobusse vorhanden. Deswegen wird ein zusätzlicher Bus benötigt, um die Stillstandzeit in geeigneter Weise zu erhöhen („Überlage“). Der Fahrzeugbedarf liegt für Gelegenheitsladung demnach bei sieben Bussen.

Zur Nachladung während des Tages sind an der Endstelle Am Unkelstein zwei Ladestationen nötig – zwei Busse würden gleichzeitig laden müssen. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die unmittelbare Nähe der Endstelle zum Betriebshof anbietet, dass die Fahrzeuge tagsüber (gelbe Phasen in Abbildung 21) im Betriebshof nachladen. Dies hat verschiedene Vorteile:

- Die Ladeinfrastruktur ist auf den Betriebshof begrenzt, es müssen keine Ladestationen im öffentlichen Bereich installiert werden.
- Die beiden Ladestationen könnten in Zeiten, in denen sie von Linie 934 nicht so häufig belegt werden, auch von anderen Bussen genutzt werden, um schnell zu laden.
- Es wird kein Ausbau des bestehenden Anschlusses an das öffentliche Stromnetz nötig. Das von Netze Duisburg verlegte Mittelspannungskabel, das die DVG-Trafostation anschließt, bietet noch ausreichend Kapazitätsreserve, um sowohl die Ladegeräte für die Abstellung mit geringerer Ladeleistung, als auch die Ladegeräte für die Schnellladung zu versorgen (siehe Kapitel 1.5).
- Der organisatorische Aufwand und Koordinierungsaufwand ist aus den oben genannten Gründen deutlich einfacher und weniger zeitintensiv.
- Ein Ausfall der Ladegeräte für die Schnellladung tagsüber könnte einfacher kompensiert werden, da die Elektrobusse in diesem Falle die Ladegeräte für die Langsamladung in der Abstellung verwenden könnten. Es müsste zwar aufgrund der längeren Ladezeiten im Worst Case mindestens ein zusätzliches Fahrzeug hinzugenommen werden, aber der Betrieb der Linie mit Elektrobussen könnte aufrechterhalten werden.
- Die Instandhaltung der Ladeinfrastruktur für die Schnellladung vereinfacht sich, da sie sich auf dem Betriebshof befinden.

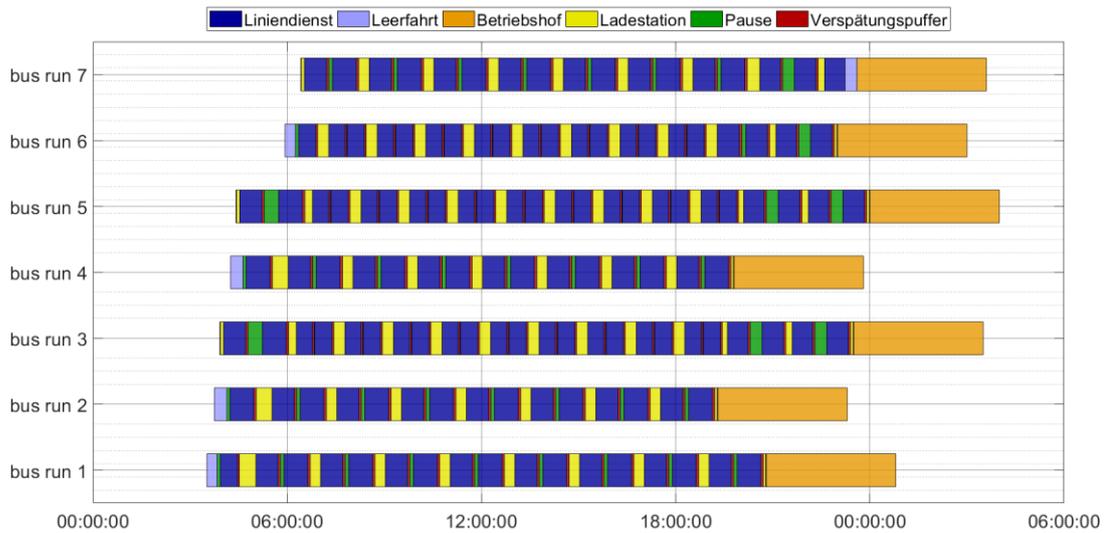


Abbildung 21: Linie 934 – Umläufe für Gelegenheitslader Typ 1 und Typ 2 mit hybridem Heizkonzept (NV-Konfiguration B)

Bei Betrieb der Linie 934 mit Brennstoffzellenbussen werden sieben Busse benötigt. Die Fahrleistung der Dieselumläufe ist für Brennstoffzellenbusse zu hoch, sodass Phasen zum Nachtanken der Busse im Betriebshof eingeplant werden müssen. Die orangenen Phasen geben dabei an, welches Zeitfenster dafür potentiell zur Verfügung steht, der Tankvorgang selber ist deutlich kürzer.

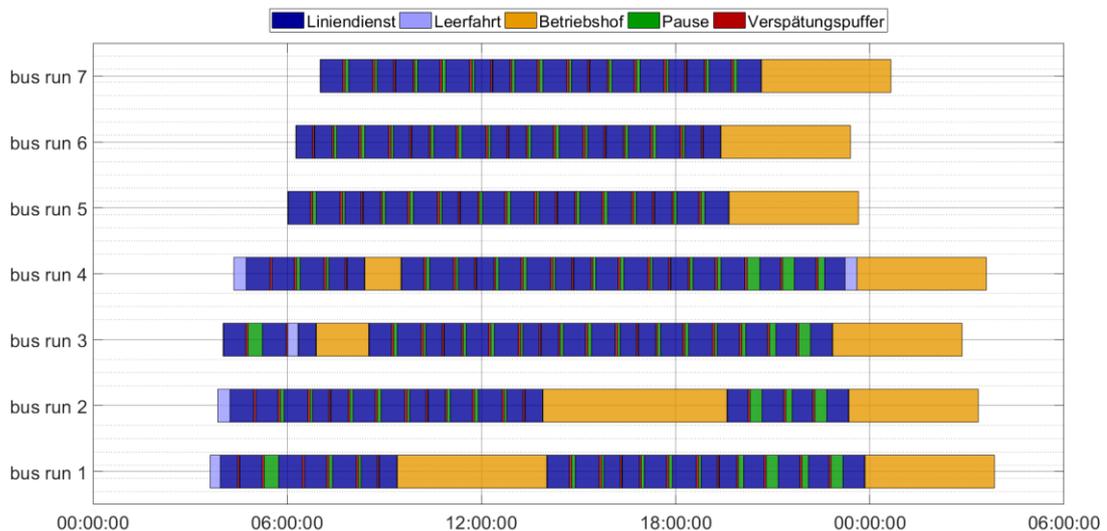


Abbildung 22: Linie 934 – Umläufe für Brennstoffzellenbusse

Abbildung 23 fasst die Ergebnisse für Linie 934 zusammen. Die betrieblichen Mehraufwendungen für die Elektrobuskonzepte sind als relative Werte bezogen auf die Gesamtfahrleistung bzw. Gesamtfahrerzeit dargestellt.

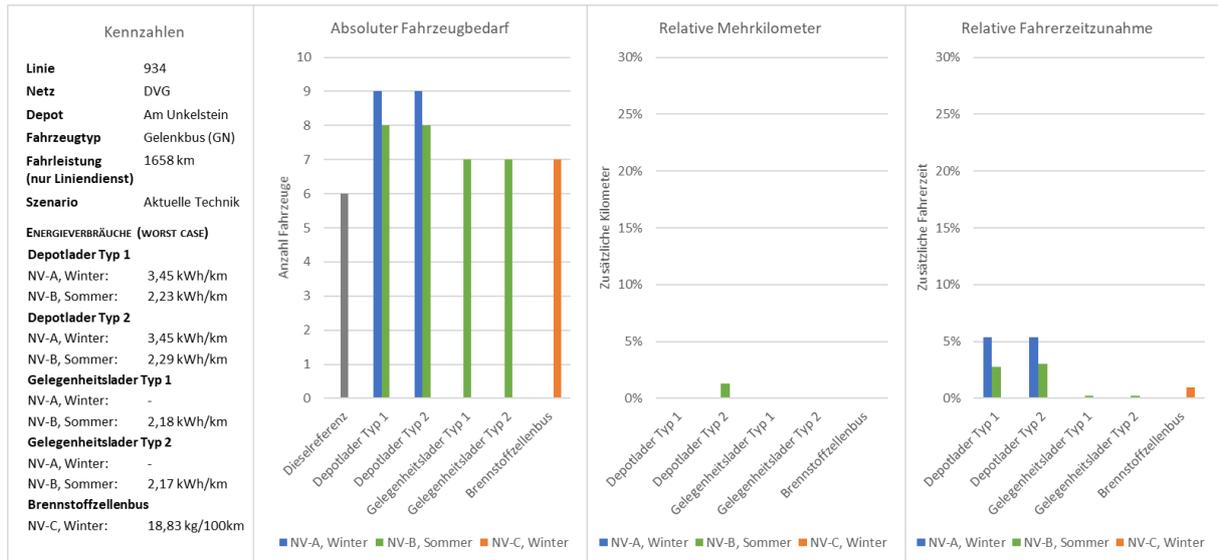


Abbildung 23 Ergebnisübersicht der technischen und betrieblichen Analyse von Linie 934

## 2.4 Ergebnisübersicht und Diskussion

Die zuvor beschriebene Detailanalyse erfolgte für alle Linien in dem Bedienungsgebiet in Duisburg. Unter Berücksichtigung der technischen Parameter der Elektrobussysteme wurden Betriebskonzepte entwickelt und hinsichtlich Fahrzeugbedarf, Leerkilometer und Fahrerzeit bewertet. Als Referenz wurde der Dieseldbusbetrieb mit Euro VI-Fahrzeugen herangezogen. Die Dieseldbusse haben aufgrund der hohen Reichweite kaum betriebliche Einschränkungen, weshalb das Dieseldbusbetriebskonzept die Untergrenze bezüglich der Fahrzeuganzahl definiert.

In Tabelle 12 sind die Ergebnisse für das Bedienungsgebiet Duisburg abgebildet. Der Fahrzeugmehrbedarf ist farblich hervorgehoben. Konzepte ohne zusätzliche Fahrzeuge im Vergleich zum Dieseldbusbetrieb sind grün markiert, Konzepte mit ein bis zwei zusätzlichen Fahrzeugen gelb und Linien mit drei und mehr zusätzlichen Fahrzeugen rot.

## Technische und betriebliche Analyse (Arbeitspaket 2)

| Linie     | Bustyp         | Anz. Fahrz.<br>Diesel-Referenz | Absoluter Fahrzeugmehrbedarf (Szenario heute) |   |                  |   |                         |   |                         |   |                          |
|-----------|----------------|--------------------------------|---|---|------------------|---|-------------------------|---|-------------------------|---|--------------------------|
|           |                |                                | Depotlader Typ 1                              |   | Depotlader Typ 2 |   | Gelegenheitslader Typ 1 |   | Gelegenheitslader Typ 2 |   | Brennstoffzellenbus<br>C |
|           |                |                                | A   | B | A                | B | A                       | B | A                       | B |                          |
| 40        | Solobus (SN)   | 2                              | 1   | 1 | 1                | 1 | 1                       | 0 | 1                       | 0 | 0                        |
| 801       | Solobus (SN)   | 3                              | 1   | 0 | 1                | 0 | 1                       | 0 | 1                       | 0 | 0                        |
| 802       | Gelenkbus (GN) | 2                              | 2   | 1 | 1                | 1 | -                       | 1 | -                       | 1 | 0                        |
| 803       | Gelenkbus (GN) | 3                              | 2   | 1 | 2                | 1 | -                       | 1 | -                       | 1 | 0                        |
| 804       | Solobus (SN)   | 2                              | 1   | 0 | 0                | 0 | 1                       | 0 | 1                       | 0 | 0                        |
| 805       | Solobus (SN)   | 2                              | 1   | 0 | 1                | 0 | 1                       | 1 | 1                       | 1 | 0                        |
| 806       | Gelenkbus (GN) | 2                              | 1   | 1 | 1                | 0 | -                       | 0 | -                       | 0 | 0                        |
| 801804805 | Solobus (SN)   | 7                              | 2   | 0 | 1                | 0 | 3                       | 2 | 3                       | 2 | 0                        |
| 802803806 | Gelenkbus (GN) | 7                              | 4   | 2 | 3                | 0 | -                       | 3 | -                       | 3 | 0                        |
| 905       | Solobus (SN)   | 3                              | 2   | 1 | 2                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                        |
| 906       | Solobus (SN)   | 3                              | 2   | 1 | 2                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                        |
| 905906    | Solobus (SN)   | 6                              | 3   | 2 | 3                | 2 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                        |
| 907       | Solobus (SN)   | 5                              | 2   | 2 | 2                | 2 | -                       | - | -                       | - | 0                        |
| 908       | Gelenkbus (GN) | 6                              | 5   | 3 | 4                | 2 | -                       | - | -                       | - | 0                        |
| 909       | Gelenkbus (GN) | 7                              | 4   | 4 | 4                | 3 | -                       | 0 | -                       | 0 | 1                        |
| 910       | Gelenkbus (GN) | 7                              | 4   | 4 | 4                | 3 | -                       | 0 | -                       | 0 | 1                        |
| 909910    | Gelenkbus (GN) | 13                             | 9   | 7 | 9                | 7 | -                       | 1 | -                       | 1 | 2                        |
| 916       | Gelenkbus (GN) | 3                              | 3   | 2 | 2                | 1 | -                       | - | -                       | - | 1                        |
| 917       | Gelenkbus (GN) | 4                              | 3   | 2 | 3                | 2 | -                       | - | -                       | - | 1                        |
| 916917    | Gelenkbus (GN) | 7                              | 6   | 4 | 5                | 3 | -                       | - | -                       | - | 1                        |
| 920       | Gelenkbus (GN) | 9                              | 8   | 5 | 6                | 4 | -                       | 2 | 3                       | 2 | 1                        |
| 921       | Gelenkbus (GN) | 9                              | 8   | 5 | 6                | 4 | -                       | 1 | -                       | 1 | 1                        |
| 922       | Solobus (SN)   | 5                              | 3   | 2 | 3                | 2 | -                       | - | -                       | - | 1                        |
| 923       | Solobus (SN)   | 5                              | 3   | 2 | 3                | 2 | -                       | - | -                       | - | 1                        |
| 922923    | Solobus (SN)   | 10                             | 6   | 5 | 5                | 3 | -                       | - | -                       | - | 1                        |
| 924       | Solobus (SN)   | 5                              | 4   | 2 | 3                | 2 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                        |
| 926       | Gelenkbus (GN) | 4                              | 3   | 2 | 3                | 2 | -                       | 1 | -                       | 1 | 1                        |
| 928       | Solobus (SN)   | 2                              | 2   | 1 | 1                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                        |
| 930       | Solobus (SN)   | 2                              | 1   | 1 | 1                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                        |
| 931       | Solobus (SN)   | 2                              | 1   | 1 | 1                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                        |
| 930931    | Solobus (SN)   | 4                              | 2   | 1 | 2                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                        |
| 9331      | Solobus (SN)   | 3                              | 1   | 1 | 1                | 0 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                        |
| 9332      | Gelenkbus (GN) | 6                              | 3   | 2 | 3                | 2 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                        |
| 934       | Gelenkbus (GN) | 6                              | 3   | 2 | 3                | 2 | -                       | 1 | -                       | 1 | 1                        |
| 935       | Solobus (SN)   | 3                              | 2   | 1 | 1                | 1 | -                       | - | -                       | - | 0                        |
| 939       | Solobus (SN)   | 2                              | 1   | 1 | 1                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                        |
| 940       | Solobus (SN)   | 4                              | 4   | 2 | 3                | 2 | -                       | - | -                       | - | 1                        |
| 941       | Gelenkbus (GN) | 7                              | 6   | 4 | 5                | 2 | 1                       | 0 | 0                       | 0 | 0                        |
| 942       | Solobus (SN)   | 5                              | 5   | 3 | 3                | 2 | -                       | 0 | -                       | 0 | 1                        |

Tabelle 12: Fahrzeugbedarf der Linien (Szenario heute/aktuelle Technik)

Die Ergebnisse lassen sich anhand der getroffenen technischen Annahmen gut plausibilisieren. Depotlader Typ 1 ist mit der kleinsten Batterie ausgestattet. Der Fahrzeugmehrbedarf ist für diesen Bustyp daher im Vergleich am höchsten. Weiterhin wird der Einfluss der NV-Konfigurationen deutlich. Die vollelektrische Heizung (NV-Konfiguration A) erfordert im Vergleich zur fossilen Zuheizung (NV-Konfiguration B) häufig eine höhere Fahrzeuganzahl, was sich durch

den höheren Verbrauch erklären lässt. Die Batteriekapazität von Depotlader Typ 2 ist höher als die von Typ 1. Durch die größere Reichweite lässt sich der Fahrzeugmehrbedarf bei einigen Linien reduzieren.

Bei Gelegenheitsladern ist der zulässige Fahrzeugmehrbedarf durch die begrenzte Stellfläche an den Endstellen nach oben limitiert, weiterhin können nicht an allen Endstellen Ladestationen gebaut werden. Entsprechende Linien sind rot hinterlegt und mit einem „-“ gekennzeichnet. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass dort wo Gelegenheitsladung möglich ist, dieses häufig ohne zusätzliche Fahrzeuge realisierbar ist. Durch die häufige Nachladung an den Endstellen ist zudem der Einfluss einer vollelektrischen Heizung (NV-Konfiguration A) geringer. Aufgrund von mangelnder Ladeinfrastruktur ist ein Betrieb der Nachtlinien jedoch nicht möglich.

Der ermittelte Fahrzeugmehrbedarf für die Brennstoffzellenbusse zeigt klar die betrieblichen Vorteile dieser technischen Lösung. In der Mehrheit der Fälle können die Linien ohne Zusatzfahrzeuge betrieben werden. Die Nutzung der Abwärme der Brennstoffzellen zum Heizen des Innenraums ermöglicht es, auf eine elektrische Zuheizung zurückzugreifen, sodass der Betrieb lokal auch im Winter vollständig emissionsfrei erfolgt. Zusätzlich zu dem geringeren Fahrzeugmehrbedarf haben Brennstoffzellenbusse den betrieblichen Vorteil, dass sie deutlich schneller nachgetankt werden können. Dies vereinfacht die Handhabung von Brennstoffzellenbussen im Betriebshof in der Praxis, da die Busse deutlich schneller wieder einsatzbereit sind. Insbesondere beim Einsatz für nicht regulären Verkehr, wie Schienenersatzverkehr oder Sonderfahrten, haben Brennstoffzellenbusse aufgrund ihrer großen Reichweite weitere Vorteile. Diese Vorteile lassen sich allerdings wirtschaftlich nur schwer quantifizieren.

Das Potential der Synergieeffekte zwischen den Linien kann man beispielsweise an den Linien 930 und 931 sehen. Für Depotlader Typ 1 und 2 mit fossiler Zuheizung (NV-Konfiguration B) werden bei der linienscharfen Betrachtung sechs Busse benötigt. Betrachtet man die beiden Linien jedoch zusammen (Linie „930931“), ergibt sich ein Fahrzeugbedarf von fünf Fahrzeugen. Für den Dieselbus, Depotlader Typ 1 und 2 mit vollelektrischer Heizung (NV-Konfiguration A), Gelegenheitslader und Brennstoffzellenbusse lassen sich dagegen keine Fahrzeuge im Vergleich zur linienscharfen Betrachtungsweise einsparen.

Für das Entwickeln eines konkreten Umstellungskonzepts ist der Einfluss von technischen Weiterentwicklungen auf die technische Machbarkeit und die betrieblichen Mehraufwendungen von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grund wurde eine identische Analyse unter Berücksichtigung von Batterien und einem Wasserstofftanksystem mit einer um 30 % erhöhten Energiedichte sowie Schnellladestationen mit einer 20 % höheren Ladeleistung durchgeführt, was eine konservative Abschätzung der technischen Weiterentwicklungen in den nächsten 6 Jahren beschreibt („Szenario + 6 Jahre“). Die Ergebnisse dieser Betrachtung sind in Tabelle 13 gezeigt.

| Linie     | Bustyp         | Absoluter Fahrzeugmehrbedarf (Szenario +6 Jahre) |   |                  |   |                         |   |                         |   |                     |  |
|-----------|----------------|--|---|------------------|---|-------------------------|---|-------------------------|---|---------------------|--|
|           |                | Depotlader Typ 1                                 |   | Depotlader Typ 2 |   | Gelegenheitslader Typ 1 |   | Gelegenheitslader Typ 2 |   | Brennstoffzellenbus |  |
|           |                | A  | B | A                | B | A                       | B | A                       | B | C                   |  |
| 40        | Solobus (SN)   | 1  | 1 | 1                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 801       | Solobus (SN)   | 1  | 0 | 0                | 0 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 802       | Gelenkbus (GN) | 1  | 1 | 1                | 0 | -                       | 1 | -                       | 1 | 0                   |  |
| 803       | Gelenkbus (GN) | 2  | 1 | 1                | 0 | -                       | 1 | -                       | 1 | 0                   |  |
| 804       | Solobus (SN)   | 1  | 0 | 0                | 0 | 1                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 805       | Solobus (SN)   | 1  | 0 | 0                | 0 | 1                       | 1 | 1                       | 1 | 0                   |  |
| 806       | Gelenkbus (GN) | 1  | 0 | 0                | 0 | 1                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 801804805 | Solobus (SN)   | 1  | 0 | 0                | 0 | 3                       | 2 | 3                       | 0 | 0                   |  |
| 802803806 | Gelenkbus (GN) | 3  | 0 | 2                | 0 | -                       | 3 | -                       | 2 | 0                   |  |
| 905       | Solobus (SN)   | 2  | 1 | 1                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 906       | Solobus (SN)   | 2  | 1 | 1                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 905906    | Solobus (SN)   | 3  | 2 | 3                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 907       | Solobus (SN)   | 2  | 2 | 2                | 1 | -                       | - | -                       | - | 0                   |  |
| 908       | Gelenkbus (GN) | 4  | 2 | 3                | 1 | -                       | - | -                       | - | 0                   |  |
| 909       | Gelenkbus (GN) | 4  | 3 | 4                | 2 | 1                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 910       | Gelenkbus (GN) | 4  | 3 | 4                | 2 | 1                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 909910    | Gelenkbus (GN) | 9  | 5 | 8                | 6 | 2                       | 1 | 1                       | 1 | 0                   |  |
| 916       | Gelenkbus (GN) | 2  | 1 | 2                | 1 | -                       | - | -                       | - | 0                   |  |
| 917       | Gelenkbus (GN) | 3  | 2 | 2                | 2 | -                       | - | -                       | - | 0                   |  |
| 916917    | Gelenkbus (GN) | 5  | 3 | 4                | 2 | -                       | - | -                       | - | 0                   |  |
| 920       | Gelenkbus (GN) | 7  | 4 | 6                | 4 | 2                       | 2 | 2                       | 2 | 0                   |  |
| 921       | Gelenkbus (GN) | 6  | 4 | 5                | 3 | -                       | 1 | -                       | 1 | 0                   |  |
| 922       | Solobus (SN)   | 3  | 2 | 2                | 1 | -                       | - | -                       | - | 0                   |  |
| 923       | Solobus (SN)   | 3  | 2 | 2                | 1 | -                       | - | -                       | - | 0                   |  |
| 922923    | Solobus (SN)   | 5  | 4 | 5                | 2 | -                       | - | -                       | - | 0                   |  |
| 924       | Solobus (SN)   | 3  | 2 | 2                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 926       | Gelenkbus (GN) | 3  | 2 | 3                | 1 | 1                       | 1 | 1                       | 1 | 0                   |  |
| 928       | Solobus (SN)   | 1  | 1 | 1                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 930       | Solobus (SN)   | 1  | 1 | 1                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 931       | Solobus (SN)   | 1  | 1 | 1                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 930931    | Solobus (SN)   | 2  | 1 | 1                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 9331      | Solobus (SN)   | 1  | 0 | 1                | 0 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 9332      | Gelenkbus (GN) | 3  | 2 | 3                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 934       | Gelenkbus (GN) | 3  | 2 | 3                | 2 | 1                       | 1 | 1                       | 1 | 0                   |  |
| 935       | Solobus (SN)   | 1  | 1 | 1                | 1 | -                       | - | -                       | - | 0                   |  |
| 939       | Solobus (SN)   | 1  | 1 | 1                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 940       | Solobus (SN)   | 3  | 2 | 2                | 1 | -                       | - | -                       | - | 0                   |  |
| 941       | Gelenkbus (GN) | 5  | 2 | 4                | 1 | 0                       | 0 | 0                       | 0 | 0                   |  |
| 942       | Solobus (SN)   | 3  | 2 | 3                | 1 | -                       | 0 | -                       | 0 | 0                   |  |

Tabelle 13: Fahrzeugbedarf der Linien (Szenario + 6 Jahre)

Der Einfluss der technischen Weiterentwicklungen wird am Beispiel von Linie 909 deutlich. Mit aktueller Technik und Depotlader Typ 2 werden mit fossiler Zuheizung (NV-Konfiguration B) noch drei zusätzliche Fahrzeuge benötigt (siehe Tabelle 12). Mit der höheren Energiedichte der Batterie reduziert sich der Mehrbedarf auf zwei Fahrzeuge (siehe Tabelle 13). Der

Betrieb mit Gelegenheitslader Typ 1 mit vollelektrischer Heizung (NV-Konfiguration A) ist im heutigen Betrieb nicht möglich. In Zukunft wird durch technische Weiterentwicklung aber ein Betrieb mit diesem Fahrzeugtyp und der gewählten NV-Konfiguration möglich.

### 3. Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkungen (Arbeitspaket 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 mit Hilfe einer Kosten-Nutzen-Gegenüberstellung ermitteln. Die Kosten wurden daher mit einer Wirtschaftlichkeitsrechnung quantifiziert. Zur Ermittlung des Nutzens einer Elektrifizierung wurden die Umweltemissionen der Konzepte ermittelt. Nachfolgend ist die Methodik der Kostenrechnung und der Bestimmung der Umweltwirkungen erläutert. Darauf aufbauend werden anknüpfend an Kapitel 2 ausgesuchte Ergebnisse im Detail vorgestellt. Anschließend werden die linienspezifischen Ergebnisse für alle Linien präsentiert und daraus liniensübergreifende Empfehlungen abgeleitet.

#### 3.1 Kostenrechnung und Bewertung

Auf Basis der technischen und betrieblichen Analyse wurden die Total Costs of Ownership (TCO) bestimmt. Hierbei wurden Kosten berücksichtigt für Anschaffung und Instandhaltung der Fahrzeuge, Batterien bzw. Brennstoffzellen, Infrastruktur, Energie sowie zusätzlicher Fahrerzeit, welche aus dem angepassten Betriebsmodell der Elektrobusse gegenüber der Dieselreferenz resultiert. Eine Übersicht mit dem in den Ergebnisgrafiken verwendeten Farbschema ist in Abbildung 24 gezeigt.



Abbildung 24: Aufschlüsselung der betrachteten Kostenanteile

Der Elektrobusmarkt befindet sich derzeit noch in seinen Anfängen. Es ist damit zu rechnen, dass eine (weitere) Kostendegression für Ladeinfrastruktur, Batterie- und Brennstoffzellensysteme eintreten wird. Gleichzeitig wird es aller Voraussicht nach zu einer Preissteigerung für Diesel, Strom und Wasserstoff über den Betrachtungszeitraum kommen. Deshalb wurde für alle Komponenten eine Preisentwicklung angenommen (siehe Kapitel 1.6). Für die Berechnung der Lebenszykluskosten wurden anschließend die voraussichtlichen Kosten zum Beschaffungszeitpunkt herangezogen, sodass den Preisentwicklungen Rechnung getragen wird.

Die linienspezifischen TCO wurden sowohl für eine Elektrifizierung im Nahbereich (2020-2025, siehe Szenario „heute“ in Kapitel 2.4) als auch für eine Elektrifizierung mit weiterentwickelter Technologie (ab 2026, siehe Szenario „+ 6 Jahre“ in Kapitel 2.4) ermittelt. Durch dieses Vorgehen kann beurteilt werden, ob die Elektrifizierung einer Linie durch weiteren technologischen Fortschritt deutlich unaufwändiger und kosteneffizienter umgesetzt werden kann.

### 3.2 Quantifizierung der Umweltwirkungen

Die relevanten Emissionen lassen sich einteilen in global und lokal wirksame Emissionen. Als global wirksame Emission ist insbesondere das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) zu betrachten. Als lokal wirksame Emissionen sind Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und Feinstaub (Particulate Matter, PM) von Relevanz. Weiterhin ist zwischen Emissionen während des Betriebs und Emissionen bei der Energieträgerbereitstellung zu unterscheiden.

#### **Global wirksame Emissionen (CO<sub>2</sub>)**

Die Schädlichkeit von Treibhausgasen, das Treibhauspotenzial (englisch Global Warming Potential GWP) wird in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten gemessen. CO<sub>2</sub> ist also nicht das einzige Treibhausgas. Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Studie allerdings nur von „X kg CO<sub>2</sub>“ und nicht von „X kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten“ gesprochen, auch wenn Letzteres gemeint ist.

Während des Betriebs verbrennt der Motor des Dieselmotors Dieselkraftstoff und emittiert dabei 2,63 kg CO<sub>2</sub> pro Liter Diesel. Der Elektrobus verursacht unmittelbar während des Betriebs keine global wirksamen Emissionen.

Für die Bereitstellung von Dieselkraftstoff (Raffinerie und Transport) wird ein ökologischer Fußabdruck von 0,34 kg CO<sub>2</sub> pro Liter Diesel angesetzt. Für den ökologischen Fußabdruck der Strombereitstellung für die Elektrobusse wird regenerativ erzeugter Strom ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen angenommen.

#### **Lokal wirksame Emissionen (NO<sub>x</sub> und PM)**

Bei den lokal wirksamen Emissionen werden nur die tatsächlich während des Fahrbetriebs erzeugten Emissionen betrachtet. Emissionen, die lokal wirksam sind, aber außerhalb der

Stadt bei der Energieträgerbereitstellung verursacht werden, sind für die städtische Luftbelastung irrelevant. Weiterhin werden Feinstaub-Emissionen, welche durch Bremsabrieb und Luftaufwirbelung verursacht werden, aus der Betrachtung ausgenommen. Zum einen sind diese nur schwer messtechnisch zu erfassen, zum anderen sind durch Bremsabrieb erzeugte Feinstaubpartikel größer und somit für den Menschen weniger gesundheitsschädlich (weniger lungengängig) als solche durch Dieselerbrennung in Verbrennungsmotoren. Es sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass Elektrobusse hier leichte Vorteile haben, da sie aufgrund des regenerativen Bremsens mittels elektrischem Antrieb weniger Bremsabrieb aufweisen.

Dieser Argumentation folgend wird daher angenommen, dass der Elektrobus keine lokal wirksamen Emissionen verursacht. Für den Dieselmotobus wird angenommen, dass er die in Abbildung 25 (Solobus) und Abbildung 26 (Gelenkbus) dargestellten Emissionen verursacht.

### **Kraftstoffverbrauch der Dieselmotobusse**

Die blaue Kurve in Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigt den angenommenen Kraftstoffverbrauch für ein Referenzfahrzeug in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit. Die Kurven sind angelehnt an Daten aus der Dissertation „Strategische Optimierung von Linienbusflotten“ von Ralph Pütz (2010) [7], welche auf Erhebungen von VDV-Mitgliedsunternehmen für Fahrzeuge der Emissionsklassen bis EEV (Enhanced Environmentally Friendly Vehicle) basiert. Die für die Belange der Studie abgeleiteten Euro VI Verbräuche und Emissionen wurden mit verschiedenen Quellen (u.a. Messungen von TNO in den Niederlanden, Messungen der FH Landshut im ZeEUS-Projekt) abgeglichen. Die Werte sind in den beiden Abbildungen für ein bestimmtes Fahrzeug-Referenzgewicht dargestellt (14,5 t bzw. 21,8 t) und werden in den nachfolgenden Berechnungen abhängig vom Belastungsgrad linear mit dem resultierenden tatsächlichen Fahrzeuggewicht skaliert. Emissionen für Bereitstellung des Kraftstoffes sind in den Abbildungen nicht dargestellt, kommen aber in den nachfolgenden Berechnungen noch hinzu entsprechend ihrem oben genannten CO<sub>2</sub>-Fußabdruck.

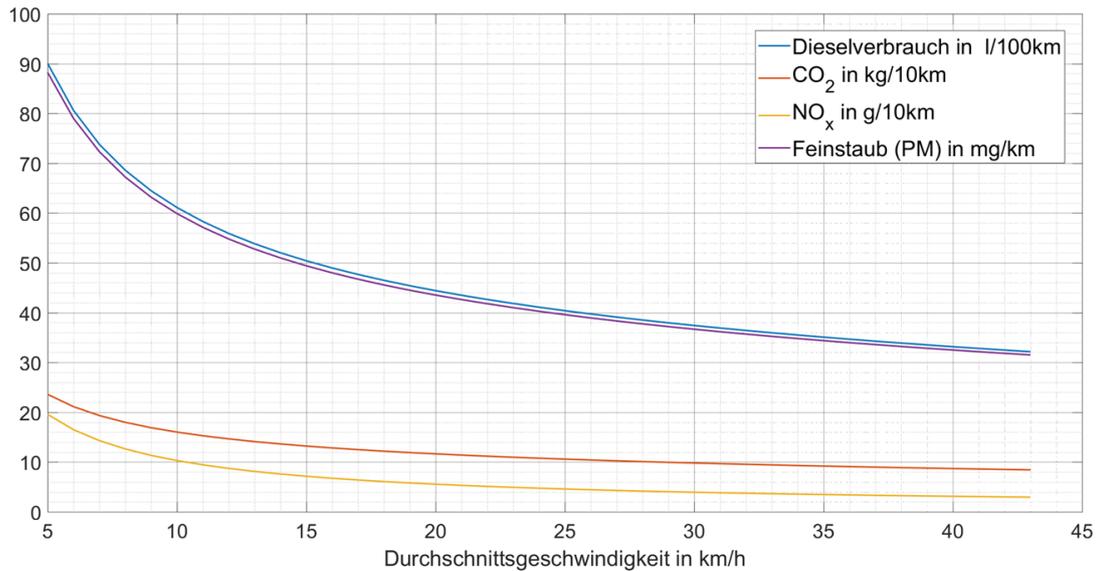


Abbildung 25: Angenommener Kraftstoffverbrauch und angenommene Emissionen des Dieselbusbetriebs (Solo-Bus, Referenzgewicht von 14,5 t).

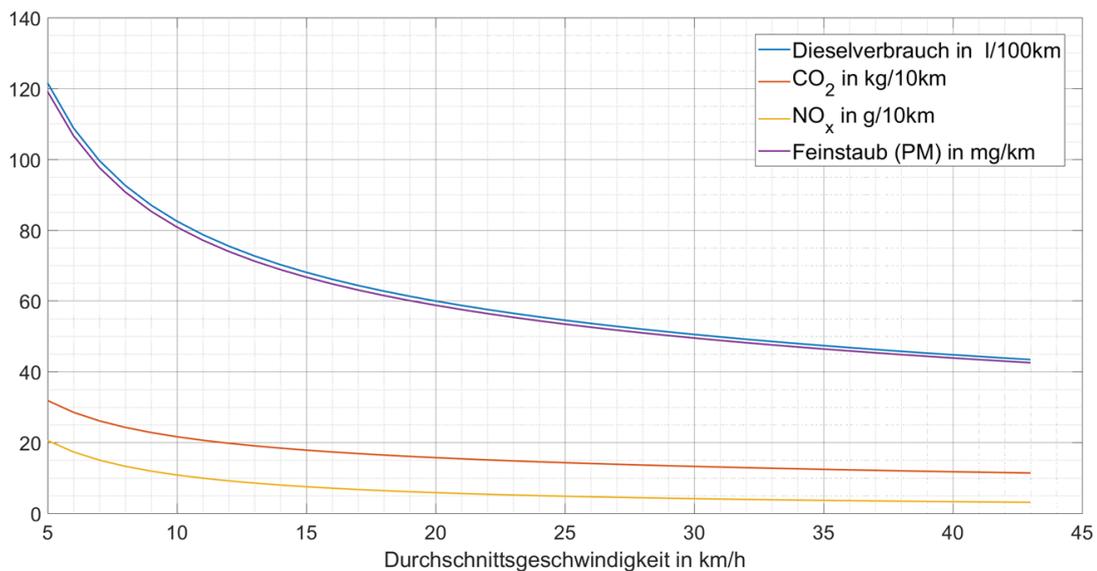


Abbildung 26: Angenommener Kraftstoffverbrauch und angenommene Emissionen des Dieselbusbetriebs (Gelenkbus, Referenzgewicht von 21,8 t).

### Emissionen des fossilen Zuheizers

Weiterhin führt der Einsatz des fossilen Zuheizers bei den Elektrobuskonzepten mit NV-Konfiguration B zu globalen und lokalen Emissionen durch die Verbrennung von Dieselmotorkraftstoff. Für die Zuheizung wird ein mittlerer Kraftstoffverbrauch von 2 l/h für den Solobus und 3 l/h für den Gelenkbus angesetzt. Diese Werte decken sich mit Erfahrungen anderer Verkehrsbetriebe aus dem Hybridbusbetrieb mit Zuheizung. Die Emissionen von ca. 1,9 g/h (Solobus) bzw. 2,9 g/h (Gelenkbus) für NO<sub>x</sub> und 0,6 g/h bzw. 0,9 g/h für PM ergeben sich aus den Messungen,

die in einer Studie über die Reduzierung der Abgasemissionen von Transportfahrzeugen im Leerlauf diskutiert werden [8]. Die Ausstoßmengen von rund 6 kg CO<sub>2</sub> pro Stunde für den Solobus und 9 kg CO<sub>2</sub> pro Stunde für den Gelenkbus leiten sich aus den Annahmen für die global wirksamen Emissionen der Dieselerverbrennung ab.

Der Zuheizung kommt ausschließlich bei tieferen Temperaturen zum Einsatz. Bei Temperaturen ab ca. 3 °C steht zum Heizen des Fahrgastraums die Wärmepumpe zur Verfügung. Anhand historischer Klimadaten der Region wird die Nutzung des Zuheizers konservativ auf 82 Tage im Jahr abgeschätzt.

### 3.3 Detaillierte Ergebnisse für Linie 934

#### **Wirtschaftlichkeitsanalyse („Kosten“)**

Im Folgenden wird Linie 934 exemplarisch zur Veranschaulichung der linienspezifischen Wirtschaftlichkeitsanalyse herangezogen. Die abgebildeten Kostendiagramme stellen die TCO der Buskonzepte für den gesamten Nutzungszeitraum zwischen 2020 und 2032 sowie die Annuitäten und die auf die Fahrleistung bezogenen Annuitäten dar. Weiterhin wurde eine Kostenrechnung einer Elektrifizierung mit fortgeschrittener Technologie vorgenommen. Dieses Zukunftsszenario geht von einem Projektstart ab 2026 aus und berücksichtigt die in Kapitel 2.4 ermittelten betrieblichen Einsatzbedingungen. Der Kostenvergleich beider Szenarien ermöglicht es, einen möglichst kosteneffizienten Umsetzungszeitraum für jede Linie zu bestimmen.

Linie 934 ist für den Dieselbusbetrieb auf sechs Gelenkbusse ausgelegt. Innerhalb der betrieblichen Analyse in Kapitel 2.3 wurde aufgezeigt, dass sich bei einer Elektrifizierung mit Depotladung ein erhöhter Fahrzeugbedarf von neun (NV-Konfiguration A) beziehungsweise acht (NV-Konfiguration B) ergibt. Dieser spiegelt sich wiederum in höheren Fahrzeugkosten wider.

Während die Kosten für die Ladeinfrastruktur und für die zusätzliche Fahrzeit durch die geringeren Energiekosten von Elektrobussen in etwa ausgeglichen werden, bleiben Mehrkosten ungefähr in Höhe der Batteriekosten und des Fahrzeugmehrbedarfs gegenüber der Dieselerferenz bestehen (siehe Abbildung 27, Abbildung 28, Abbildung 29).

Durch die Entlastung der Batterie und den preiswerten Heizstoff (Heizöl) führt die Verwendung eines fossilen Zuheizers immer zu wirtschaftlicheren Resultaten als vollelektrisches Heizen. Im Beispiel der Linie 934 stellt sich die Gelegenheitsladung mit einer installierten Batteriekapazität von 220 kWh und der Ladeleistung von 300 kW an der Endstelle Betriebshof Am Unkelstein als kosteneffizienteste Lösung unter den Elektrobuskonzepten heraus. Mit einem Barwert in Höhe von ca. 11,8 Mio. € für die 12 Jahre liegen die linienspezifischen TCO knapp 39% über denen für Dieselbusse.

Die Kosten für Brennstoffzellenbusse belaufen sich auf etwa 19 Mio. €. Diese sind damit mehr als doppelt so hoch wie die Dieselreferenz und 1,6-mal höher als für den erwähnten Gelegenheitslader. Dieses Ergebnis für die Brennstoffzellenbusse resultiert aus den erheblichen Energiekosten, die die anteilige Abschreibung der Erzeugungsanlagen miteinbeziehen.

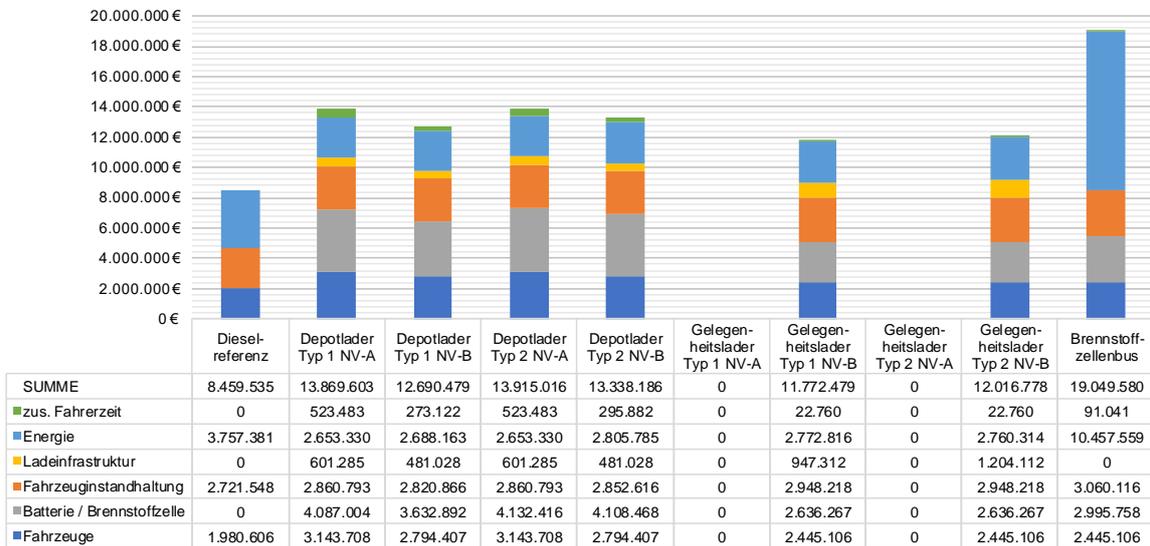


Abbildung 27: Linie 934 - TCO als Barwerte (12 Jahre) (Szenario: aktuelle Technik, Bezugsjahr: 2020)

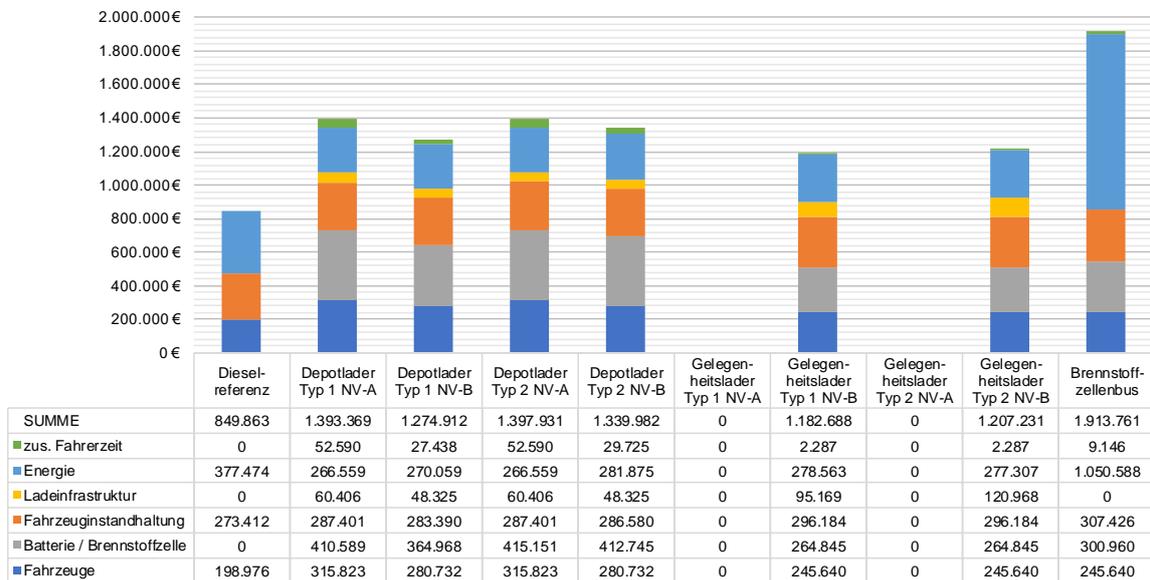


Abbildung 28: Linie 934 - TCO als Annuitäten (12 Jahre) (Szenario: aktuelle Technik, Bezugsjahr: 2020)

## Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkungen (Arbeitspaket 3)

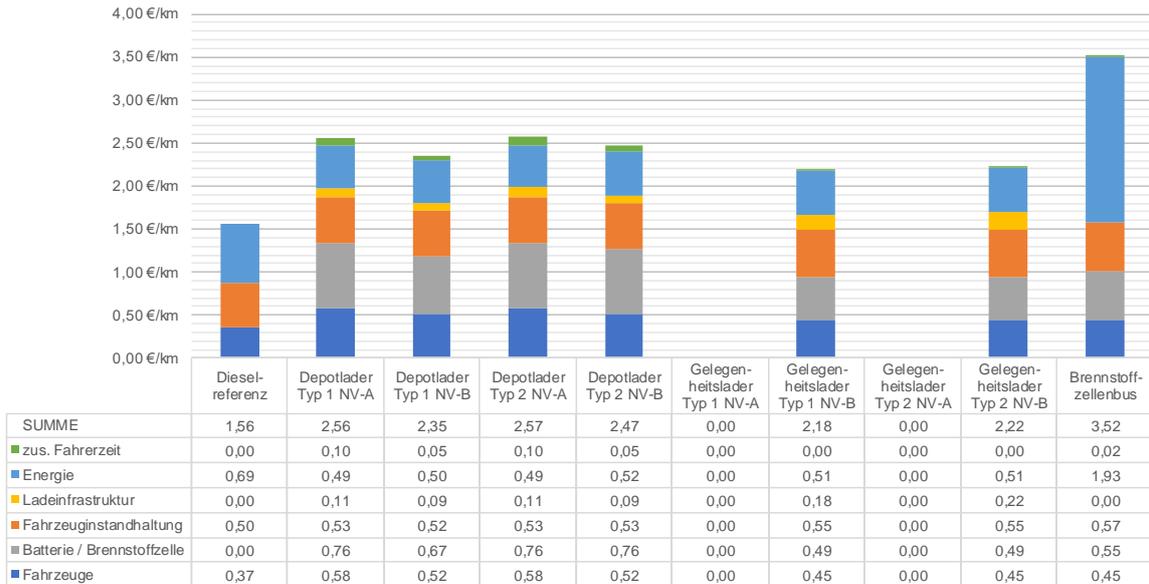


Abbildung 29: Linie 934 – TCO als Annuitäten pro Nutzkilometer (12 Jahre) (Szenario: aktuelle Technik, Bezugsjahr: 2020)

Im Zukunftsszenario lassen sich durch technologischen Fortschritt keine wesentlichen Einsparungen erzielen (Abbildung 30). So kann die Anzahl der Fahrzeuge durch die größeren Batterien bei der Depotladung nicht reduziert werden. Die höheren Kosten sowohl für den Dieseltreibstoff als auch für das kosteneffizienteste Elektrobuskonzept im Zukunftsszenario lassen sich auf die höheren Energiekosten zurückführen.

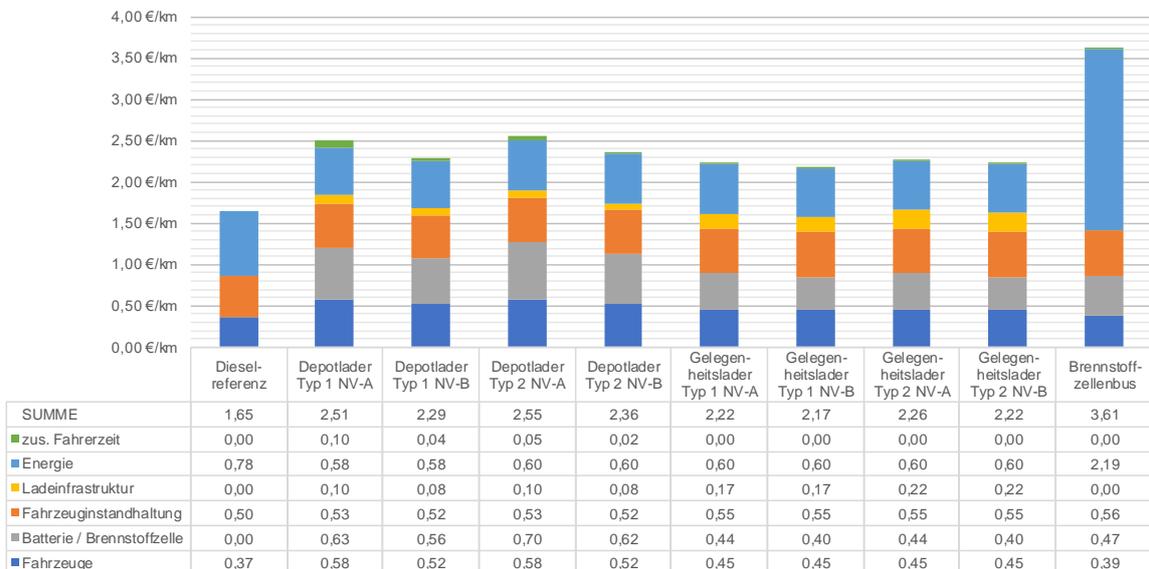


Abbildung 30: Linie 934 - Annuitäten pro Nutzkilometer (12 Jahre) (Szenario: fortgeschrittene Technik, Bezugsjahr: 2026)

Insgesamt ergibt sich für Linie 934, dass das Konzept der Gelegenheitslader vom Typ 1 den wirtschaftlichsten Betrieb von Elektrobussen ermöglicht. Abgesehen von der Wirtschaftlichkeit bietet dieses Konzept noch die in Kapitel 2.3 genannten Vorteile hinsichtlich Umsetzung.

Die Investitionskosten für diese Lösung (Gelegenheitsladung Typ 1 NV-B) liegen um ca. 2,2 Mio. € höher als die der Dieselreferenz (Abbildung 31). Eine Reduzierung der Belastung durch die erhöhten Anfangsinvestitionen kann ggfs. über Förderprogramme realisiert werden, wie in Kapitel 4 näher erläutert wird.

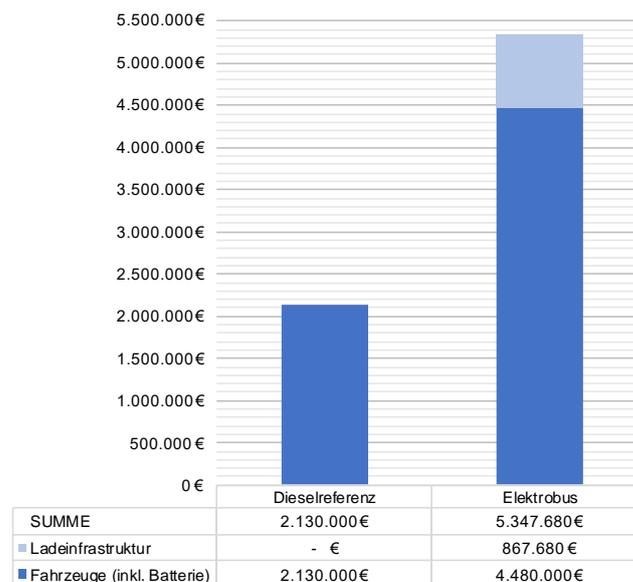


Abbildung 31: Linie 934 – Vergleich der Investitionskosten zwischen Dieselreferenz und Gelegenheitsladung (Szenario: aktuelle Technik, Bezugsjahr: 2020)

### Emissionseinsparungspotential („Nutzen“)

Abbildung 32 zeigt die Emissionen der verschiedenen Konzepte. Wie eingangs erläutert, wird ausschließlich Ökostrom zum Laden der Batteriebusse verwendet. Somit wird bilanziell kein CO<sub>2</sub> durch den Strombezug emittiert. Weiterhin wird ersichtlich, dass der Einsatz eines fossilen Zuheizers nur einen geringen Einfluss auf die positive Ökobilanz von Elektrobussen gegenüber Dieseln mit Euro VI-Abgasnorm hat. Insgesamt lassen sich durch Umstellung der Linie 934 auf Elektrobuss pro Jahr rund 950 t CO<sub>2</sub>, 300 kg NO<sub>x</sub> und 7,1 kg Feinstaub einsparen.

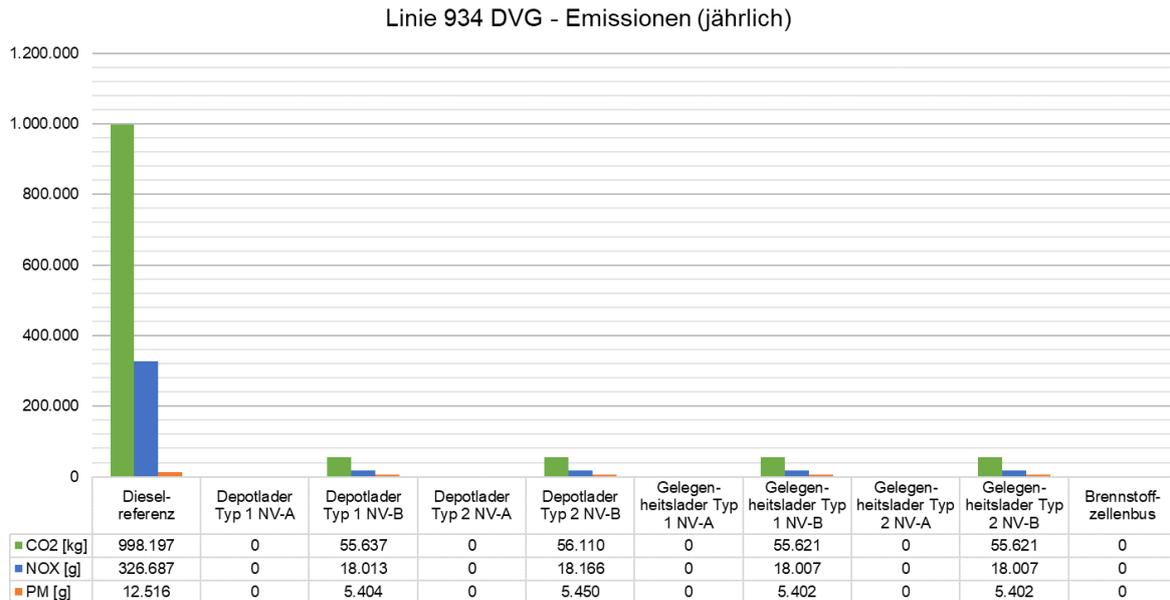


Abbildung 32: Linie 934 - jährliche Emissionen

Entsprechend EU-Direktive 2009/33/EC<sup>5</sup> können diese Emissionen mit Kosten (Green Public Procurement Costs, GPP) assoziiert werden, und zwar:

- für CO<sub>2</sub>: 3 bis 8 ct/kg
- für NO<sub>x</sub>: 0,44 bis 0,88 ct/g
- für PM: 8,7 bis 16,4 ct/g

Das genannte Einsparungspotential für die drei Emissionsarten führt demnach zu Werten von bis zu 80.000 € pro Jahr.

### Auswirkung unterschiedlicher Wasserstoffbezugskosten auf die TCO

Auf Grundlage der Kostenanalyse des Projekts „NewBusFuel“ [2] wurde der Wasserstoffpreis zu 11 €/kg angenommen (siehe Kapitel 1.6.3). Aus den Kostendiagrammen für die Linie 934 wird ersichtlich, dass insbesondere die Energiekosten für die hohen TCO der Brennstoffzellenbusse verantwortlich sind. Diese beinhalten die kostenintensive Abschreibung der Erzeugungsanlage und der Tankstelle sowie die Strombezugskosten für die Elektrolyse. Im Vergleich zu den Batteriebusen ist der Brennstoffzellenbus daher deutlich kostenintensiver.

In der Branche kursieren derzeit Angebote von Anlagenbauern, die reduzierte Wasserstoffpreise von bis zu 6,90 €/kg für den Endkunden zusichern. Aus diesem Grund werden im Folgenden exemplarisch für die Linie 934 die linienspezifischen Kosten bei Umstellung auf Brennstoffzellenbusse mit unterschiedlichen Wasserstoffbezugskosten betrachtet. Die Variation des Wasserstoffpreises zwischen 11 €/kg und 3,35 €/kg soll eine bessere Einschätzung über

<sup>5</sup> <http://ec.europa.eu/environment/gpp/lcc.htm> ; Direktive derzeit in Überarbeitung

die voraussichtliche Wirtschaftlichkeit von Brennstoffzellenbussen ermöglichen. Zum Vergleich sind außerdem die Kosten für die Dieselreferenz und für die kostengünstigste Elektrobüslösung (Gelegenheitslader Typ 1) aufgeführt.

Der Kostenvergleich mit dem Gelegenheitslader Typ 1 bei einem reduzierten Wasserstoffpreis von 8 €/kg weist immer noch Mehrkosten von knapp 45 % auf. Erst bei einer Reduzierung auf ca. 3,35 €/kg liegen die TCO des Brennstoffzellenbusses auf dem Niveau des wirtschaftlichsten Batteriebuskonzepts für die Linie 934. Dieser Wasserstoffpreis erscheint, wenn überhaupt, nur bei Nutzung von „grauem Wasserstoff“, welcher als Nebenprodukt der chemischen Industrie anfällt, möglich. Allerdings entstehen bei der Herstellung von grauem Wasserstoff nicht unerhebliche Emissionen. Im Folgenden wird mit einem Wasserstoffpreis von 11 €/kg gerechnet.

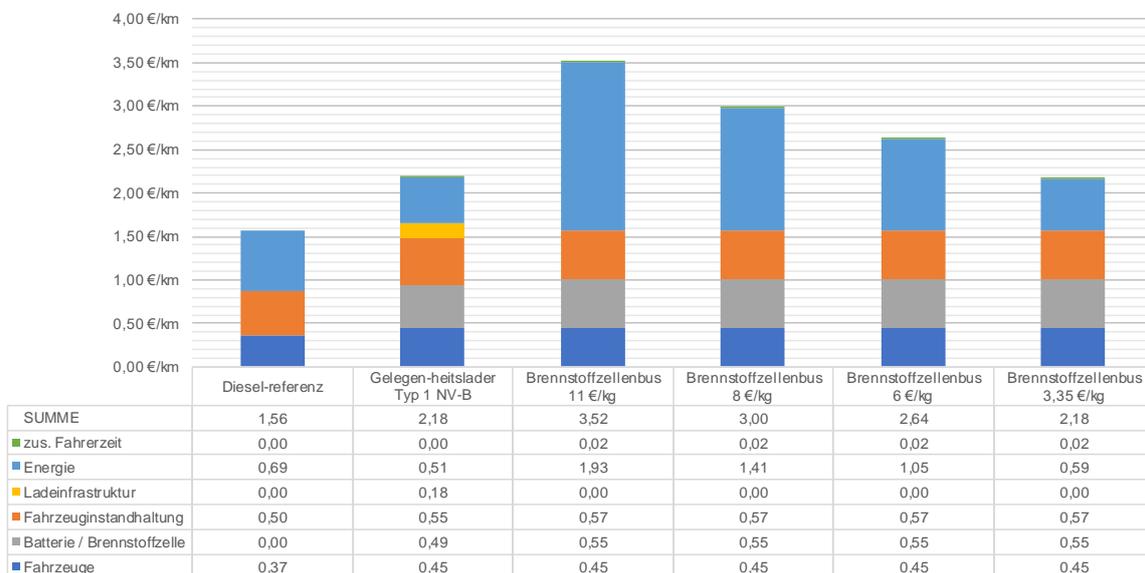


Abbildung 33: Linie 934 - Annuitäten pro Nutzkilometer bei Variation des Wasserstoffpreises (Szenario: aktuelle Technik, Bezugsjahr: 2020)

### 3.4 Ergebnisübersicht und Diskussion

Die exemplarisch für die Linien 934 beschriebene Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde für alle regulären Buslinien im Bedienungsgebiet durchgeführt. Entsprechend wurde auf Grundlage der TCO das kosteneffizienteste Elektrobüskonzept zur Umstellung jeder Linie ausgewählt. Von dieser Analyse ausgenommen wurden die Nachtlinien, da der Nachtbetrieb durch Busse der regulären Linien abgedeckt werden soll. Eine linienspezifische Betrachtung der Nachtlinien wäre deshalb nicht zielführend. Diese werden allerdings im nachfolgenden Kapitel im Rahmen der linienspezifischen Empfehlungen berücksichtigt.

## Wirtschaftlichkeit

In den nachfolgenden Übersichten (Tabelle 14 und Tabelle 15) sind die relativen Mehrkosten der Ladekonzepte gegenüber der Dieselreferenz für jede Linie gelistet. Dabei geht das Szenario „heute“ von einer Elektrifizierung im Jahre 2020 mit dem aktuellen Stand der Technik aus. Das Szenario „+6 Jahre“ hingegen geht von einer Elektrifizierung im Jahre 2026 mit fortgeschrittener Technik aus. Die linienspezifischen Mehrkosten sind zur Veranschaulichung farblich eingestuft, vom günstigsten Ladekonzept (grün) bis zum teuersten (rot). Wie in Kapitel 2 (technische und betriebliche Analyse) erwähnt wurde, ist, beispielsweise aufgrund von Platzmangel oder fehlender Stillstandzeit, ein Nachladen von Gelegenheitsladern an einigen Endstellen nicht möglich. Für die betroffenen Linien wurden daher die TCO für Gelegenheitsladung nicht berechnet.

| Linie  | Bustyp         | Annuitäten pro<br>Nutzkilometer<br><br>Dieselreferenz | Relative Mehrkosten in % (Szenario heute) |     |                  |     |                             |     |                             |     |                               |
|--------|----------------|---|---|-----|------------------|-----|-----------------------------|-----|-----------------------------|-----|-------------------------------|
|        |                |   | Depotlader Typ 1                          |     | Depotlader Typ 2 |     | Gelegenheits-lader<br>Typ 1 |     | Gelegenheits-lader<br>Typ 2 |     | Brennstoff-<br>zellenbus<br>C |
|        |                |   | A   | B   | A                | B   | A                           | B   | A                           | B   |                               |
| 40     | Solobus (SN)   | 1,27 €/km   | 82%                                       | 79% | 88%              | 85% | 104%                        | 49% | 119%                        | 57% | 93%                           |
| 905    | Solobus (SN)   | 1,24 €/km   | 114%                                      | 71% | 103%             | 69% | 46%                         | 43% | 53%                         | 50% | 119%                          |
| 906    | Solobus (SN)   | 1,20 €/km   | 111%                                      | 66% | 101%             | 64% | 33%                         | 30% | 36%                         | 33% | 106%                          |
| 905906 | Solobus (SN)   | 1,22 €/km   | 101%                                      | 69% | 94%              | 66% | 38%                         | 30% | 40%                         | 34% | 106%                          |
| 907    | Solobus (SN)   | 1,29 €/km   | 84%                                       | 72% | 79%              | 68% | -                           | -   | -                           | -   | 113%                          |
| 908    | Gelenkbus (GN) | 1,99 €/km   | 135%                                      | 87% | 112%             | 76% | -                           | -   | -                           | -   | 128%                          |
| 909    | Gelenkbus (GN) | 1,68 €/km   | 102%                                      | 78% | 91%              | 70% | -                           | 30% | -                           | 33% | 135%                          |
| 910    | Gelenkbus (GN) | 1,67 €/km   | 101%                                      | 79% | 89%              | 71% | -                           | 30% | -                           | 33% | 133%                          |
| 909910 | Gelenkbus (GN) | 1,64 €/km   | 106%                                      | 80% | 93%              | 75% | -                           | 33% | -                           | 36% | 140%                          |
| 916    | Gelenkbus (GN) | 1,66 €/km   | 108%                                      | 81% | 95%              | 70% | -                           | -   | -                           | -   | 146%                          |
| 917    | Gelenkbus (GN) | 1,64 €/km   | 101%                                      | 81% | 100%             | 76% | -                           | -   | -                           | -   | 140%                          |
| 916917 | Gelenkbus (GN) | 1,65 €/km   | 107%                                      | 77% | 95%              | 72% | -                           | -   | -                           | -   | 139%                          |
| 920    | Gelenkbus (GN) | 1,63 €/km   | 103%                                      | 75% | 86%              | 70% | -                           | 41% | 65%                         | 43% | 134%                          |
| 921    | Gelenkbus (GN) | 1,66 €/km   | 107%                                      | 68% | 80%              | 66% | -                           | 34% | -                           | 36% | 132%                          |
| 922    | Solobus (SN)   | 1,25 €/km   | 107%                                      | 72% | 91%              | 72% | -                           | -   | -                           | -   | 122%                          |
| 923    | Solobus (SN)   | 1,22 €/km   | 106%                                      | 71% | 91%              | 66% | -                           | -   | -                           | -   | 115%                          |
| 922923 | Solobus (SN)   | 1,24 €/km   | 99%                                       | 70% | 91%              | 63% | -                           | -   | -                           | -   | 118%                          |
| 924    | Solobus (SN)   | 1,22 €/km   | 123%                                      | 71% | 91%              | 65% | 32%                         | 27% | 37%                         | 29% | 105%                          |
| 926    | Gelenkbus (GN) | 1,57 €/km   | 88%                                       | 70% | 87%              | 66% | -                           | 51% | -                           | 57% | 130%                          |
| 928    | Solobus (SN)   | 1,16 €/km   | 120%                                      | 77% | 91%              | 73% | 44%                         | 37% | 49%                         | 42% | 95%                           |
| 930    | Solobus (SN)   | 1,28 €/km   | 85%                                       | 71% | 83%              | 76% | 42%                         | 42% | 48%                         | 48% | 107%                          |
| 931    | Solobus (SN)   | 1,31 €/km   | 82%                                       | 72% | 84%              | 77% | 42%                         | 42% | 49%                         | 49% | 108%                          |
| 930931 | Solobus (SN)   | 1,29 €/km   | 78%                                       | 60% | 80%              | 64% | 42%                         | 42% | 49%                         | 49% | 107%                          |
| 9331   | Solobus (SN)   | 1,57 €/km   | 82%                                       | 69% | 80%              | 49% | 48%                         | 46% | 54%                         | 51% | 110%                          |
| 9332   | Gelenkbus (GN) | 2,01 €/km   | 91%                                       | 68% | 92%              | 70% | 40%                         | 32% | 44%                         | 34% | 125%                          |
| 934    | Gelenkbus (GN) | 1,56 €/km   | 64%                                       | 50% | 64%              | 58% | -                           | 39% | -                           | 42% | 125%                          |
| 935    | Solobus (SN)   | 1,26 €/km   | 118%                                      | 65% | 80%              | 67% | -                           | -   | -                           | -   | 106%                          |
| 939    | Solobus (SN)   | 1,20 €/km   | 78%                                       | 67% | 75%              | 69% | 43%                         | 40% | 49%                         | 46% | 109%                          |
| 940    | Solobus (SN)   | 1,25 €/km   | 132%                                      | 84% | 105%             | 72% | -                           | -   | -                           | -   | 122%                          |
| 941    | Gelenkbus (GN) | 1,86 €/km   | 124%                                      | 86% | 99%              | 66% | 51%                         | 35% | 42%                         | 29% | 114%                          |
| 942    | Solobus (SN)   | 1,18 €/km   | 140%                                      | 94% | 100%             | 70% | -                           | 33% | -                           | 37% | 118%                          |

Tabelle 14 Relative Mehrkosten der Linien (Szenario: aktuelle Technik, Bezugsjahr: 2020)

| Linie  | Bustyp         | Annuitäten pro Nutzkilometer<br>Dieselreferenz | Relative Mehrkosten in % (Szenario +6 Jahre) |     |                  |     |                          |     |                          |     |                          |
|--------|----------------|--|--|-----|------------------|-----|--------------------------|-----|--------------------------|-----|--------------------------|
|        |                |  | Depotlader Typ 1                             |     | Depotlader Typ 2 |     | Gelegenheits-lader Typ 1 |     | Gelegenheits-lader Typ 2 |     | Brennstoffzellenbus<br>C |
|        |                |  | A  | B   | A                | B   | A                        | B   | A                        | B   |                          |
| 40     | Solobus (SN)   | 1,33 €/km                                      | 72%  | 69% | 85%              | 83% | 44%                      | 44% | 52%                      | 51% | 95%                      |
| 905    | Solobus (SN)   | 1,31 €/km                                      | 85%  | 54% | 66%              | 61% | 38%                      | 38% | 45%                      | 45% | 106%                     |
| 906    | Solobus (SN)   | 1,26 €/km                                      | 83%  | 49% | 65%              | 49% | 25%                      | 25% | 29%                      | 29% | 99%                      |
| 905906 | Solobus (SN)   | 1,28 €/km                                      | 79%  | 51% | 70%              | 46% | 30%                      | 25% | 35%                      | 29% | 101%                     |
| 907    | Solobus (SN)   | 1,36 €/km                                      | 74%  | 54% | 62%              | 46% | -                        | -   | -                        | -   | 107%                     |
| 908    | Gelenkbus (GN) | 2,09 €/km                                      | 96%  | 62% | 84%              | 56% | -                        | -   | -                        | -   | 124%                     |
| 909    | Gelenkbus (GN) | 1,77 €/km                                      | 75%  | 55% | 71%              | 55% | 39%                      | 26% | 28%                      | 28% | 121%                     |
| 910    | Gelenkbus (GN) | 1,76 €/km                                      | 74%  | 58% | 70%              | 55% | 38%                      | 26% | 28%                      | 28% | 121%                     |
| 909910 | Gelenkbus (GN) | 1,73 €/km                                      | 77%  | 55% | 73%              | 57% | 35%                      | 29% | 31%                      | 31% | 120%                     |
| 916    | Gelenkbus (GN) | 1,75 €/km                                      | 74%  | 55% | 76%              | 52% | -                        | -   | -                        | -   | 126%                     |
| 917    | Gelenkbus (GN) | 1,72 €/km                                      | 85%  | 62% | 71%              | 60% | -                        | -   | -                        | -   | 125%                     |
| 916917 | Gelenkbus (GN) | 1,74 €/km                                      | 79%  | 58% | 75%              | 54% | -                        | -   | -                        | -   | 126%                     |
| 920    | Gelenkbus (GN) | 1,72 €/km                                      | 78%  | 56% | 74%              | 53% | 43%                      | 36% | 47%                      | 38% | 123%                     |
| 921    | Gelenkbus (GN) | 1,75 €/km                                      | 65%  | 53% | 61%              | 47% | -                        | 30% | -                        | 31% | 118%                     |
| 922    | Solobus (SN)   | 1,32 €/km                                      | 74%  | 56% | 68%              | 48% | -                        | -   | -                        | -   | 106%                     |
| 923    | Solobus (SN)   | 1,29 €/km                                      | 74%  | 55% | 67%              | 46% | -                        | -   | -                        | -   | 102%                     |
| 922923 | Solobus (SN)   | 1,30 €/km                                      | 72%  | 54% | 61%              | 49% | -                        | -   | -                        | -   | 104%                     |
| 924    | Solobus (SN)   | 1,29 €/km                                      | 74%  | 53% | 64%              | 43% | 28%                      | 20% | 24%                      | 23% | 97%                      |
| 926    | Gelenkbus (GN) | 1,65 €/km                                      | 72%  | 54% | 70%              | 47% | 46%                      | 41% | 52%                      | 45% | 114%                     |
| 928    | Solobus (SN)   | 1,22 €/km                                      | 74%  | 61% | 72%              | 56% | 36%                      | 33% | 41%                      | 38% | 95%                      |
| 930    | Solobus (SN)   | 1,35 €/km                                      | 66%  | 60% | 71%              | 68% | 37%                      | 36% | 44%                      | 42% | 107%                     |
| 931    | Solobus (SN)   | 1,38 €/km                                      | 70%  | 60% | 72%              | 69% | 38%                      | 36% | 44%                      | 43% | 108%                     |
| 930931 | Solobus (SN)   | 1,36 €/km                                      | 65%  | 48% | 58%              | 50% | 38%                      | 36% | 44%                      | 42% | 107%                     |
| 9331   | Solobus (SN)   | 1,64 €/km                                      | 66%  | 36% | 79%              | 44% | 42%                      | 42% | 47%                      | 47% | 110%                     |
| 9332   | Gelenkbus (GN) | 2,11 €/km                                      | 74%  | 57% | 80%              | 50% | 34%                      | 27% | 30%                      | 29% | 117%                     |
| 934    | Gelenkbus (GN) | 1,65 €/km                                      | 52%  | 39% | 54%              | 43% | 34%                      | 32% | 37%                      | 35% | 119%                     |
| 935    | Solobus (SN)   | 1,33 €/km                                      | 68%  | 52% | 64%              | 49% | -                        | -   | -                        | -   | 105%                     |
| 939    | Solobus (SN)   | 1,26 €/km                                      | 62%  | 53% | 61%              | 59% | 35%                      | 35% | 41%                      | 41% | 108%                     |
| 940    | Solobus (SN)   | 1,32 €/km                                      | 90%  | 60% | 72%              | 57% | -                        | -   | -                        | -   | 103%                     |
| 941    | Gelenkbus (GN) | 1,95 €/km                                      | 84%  | 54% | 75%              | 47% | 31%                      | 24% | 35%                      | 25% | 112%                     |
| 942    | Solobus (SN)   | 1,25 €/km                                      | 92%  | 58% | 79%              | 49% | -                        | 25% | -                        | 29% | 98%                      |

Tabelle 15: Relative Mehrkosten der Linien (Szenario: fortgeschrittene Technik, Bezugsjahr: 2026)

Die kostengünstigsten Elektrobusskonzepte liegen bei Mehrkosten im Bereich von 27 % bis 76 % für das Szenario „heute“ und zwischen 20 % und 60 % für das Szenario „+6 Jahre“. Dort, wo Gelegenheitsladung umsetzbar ist, können die Gelegenheitslader oftmals deutlich wirtschaftlicher betrieben werden als Depotlader. Dies gilt besonders für Linien, bei denen die Ladeinfrastrukturkosten verglichen mit den Fahrzeug-, Batterie- und Energiekosten relativ gering ins Gewicht fallen. Zudem ermöglicht Gelegenheitsladung durch das häufige Nachladen den Einsatz kleinerer Batterien und eine erhöhte Batterielevensdauer durch moderate Zyklientiefen (Betrieb in einem schmaleren Ladezustandsbereich).

Die Ergebnisse sind in Zusammenhang mit den Erkenntnissen aus Kapitel 2 zu bewerten. In den meisten Fällen sind die günstigeren Elektrobusskonzepte die, welche jeweils den geringeren Fahrzeugbedarf haben. Sobald der Einsatz von Depot- und Gelegenheitsladern des Typs 2 zu einem geringeren Fahrzeugbedarf (bei der Abdeckung desselben Fahrplans) gegenüber Depot- und Gelegenheitsladern des Typs 1 führt, ist Typ 2 die deutlich wirtschaftlichere Lösung. Ähnlich verhält es sich, wenn aufgrund der höheren Ladeleistung von Gelegenheitslader Typ 2 weniger Ladeorte bzw. Ladestationen nötig werden also bei Typ 1. Bei gleichem Bedarf an Fahrzeugen und Ladeorten/-stationen für beide Typen sind die Konzepte vom Typ 1 die günstigere Variante, da die Batterie- und Ladeinfrastrukturkosten geringer ausfallen. Gleiches zeigt sich auch beim Vergleich der Elektrifizierung mit dem heutigen Stand der Technik zu einer

fortgeschrittenen Technik im Zukunftsszenario. Sobald die fortgeschrittene Technik zu geringerem Fahrzeugbedarf bei gleichem Ladekonzept führt, resultieren daraus in aller Regel geringere TCO im Zukunftsszenario.

Die Nutzung eines fossilen Zuheizers führt bei einigen Linien zu einem geringeren Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturbedarf. In diesen Fällen sind dadurch deutliche Einsparungen möglich. Darüber hinaus ist das Heizen mit dem fossilen Zuheizer immer preiswerter als das vollelektrische Heizen, da hier geringere Kosten für Energie und Batterienutzung anfallen.

Aus der Übersicht wird ferner ersichtlich, dass Brennstoffzellenbusse zu den höchsten Kosten führen. Insbesondere die hohen Kosten für die Wasserstoffherzeugung sowie die hohen Anschaffungskosten und die begrenzte Lebensdauer der Brennstoffzellen sind dafür ursächlich. Die betrieblichen Vorteile eines geringeren Fahrzeugbedarfs reichen für keine der regulären Linien aus, um einen Betrieb mit Brennstoffzellenbussen aus wirtschaftlicher Sicht zu rechtfertigen. Es muss angemerkt werden, dass bei einer vollständigen Umstellung der Flotte auf Elektrobusse Fahrzeuge zur Abdeckung von Sonderfahrten benötigt werden. Aufgrund höherer Reichweiten und geringerer Abhängigkeit von streckenspezifischer Ladeinfrastruktur sind Brennstoffzellenbusse für diese Aufgabe flexibler einsetzbar als Batteriebusse. Dennoch ist zu bezweifeln, dass diese Flexibilität die deutlichen Mehrkosten rechtfertigen.

### **Umweltwirkung**

Für alle Linien wurden die Umweltauswirkungen bei einer Umstellung auf Elektrobusse quantifiziert. In den folgenden Tabellen findet sich ein Vergleich aller jährlichen Emissionen für die verschiedenen Konzepte (siehe Tabelle 16 bis Tabelle 18). Unter der Prämisse eines emissionsfreien Strombezugs schneiden alle Elektrobuskonzepte für alle Linien sehr gut ab. Die Emissionen durch einen Einsatz eines Heizöl-Zuheizers (NV-B) in den Batteriebussen sind verglichen mit den Einsparungen gegenüber der Dieselreferenz (Euro VI) gering. Die verursachten Emissionen durch den Heizöl-Zuheizer unterscheiden sich für die verschiedenen Konzepte geringfügig aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten im Liniendienst und der Leerkilometer.

## Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkungen (Arbeitspaket 3)

| Linie                                  | Bustyp         | Dieselreferenz | CO2 in kg        |         |                  |         |                         |         |                         |         | Brennstoffzellenbus<br>C |
|--|----------------|----------------|------------------|---------|------------------|---------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|--------------------------|
|  |                |                | Depotlader Typ 1 |         | Depotlader Typ 2 |         | Gelegenheitslader Typ 1 |         | Gelegenheitslader Typ 2 |         |                          |
|  |                |                | A                | B       | A                | B       | A                       | B       | A                       | B       |                          |
| 40                                     | Solobus (SN)   | 145.349        | 0                | 5.560   | 0                | 5.482   | 0                       | 5.325   | 0                       | 5.325   | 0                        |
| 801                                    | Solobus (SN)   | 96.660         | 0                | 4.844   | 0                | 4.844   | 0                       | 4.844   | 0                       | 4.844   | 0                        |
| 802                                    | Gelenkbus (GN) | 104.444        | 0                | 6.014   | 0                | 5.944   | 0                       | 5.944   | 0                       | 5.944   | 0                        |
| 803                                    | Gelenkbus (GN) | 161.310        | 0                | 7.897   | 0                | 7.756   | 0                       | 7.686   | 0                       | 7.686   | 0                        |
| 804                                    | Solobus (SN)   | 61.762         | 0                | 2.748   | 0                | 2.748   | 0                       | 3.799   | 0                       | 3.799   | 0                        |
| 805                                    | Solobus (SN)   | 60.169         | 0                | 3.114   | 0                | 3.114   | 0                       | 3.161   | 0                       | 3.161   | 0                        |
| 806                                    | Gelenkbus (GN) | 75.302         | 0                | 4.138   | 0                | 4.068   | 0                       | 5.637   | 0                       | 5.637   | 0                        |
| 905                                    | Solobus (SN)   | 357.252        | 0                | 19.077  | 0                | 18.426  | 0                       | 17.450  | 0                       | 17.450  | 0                        |
| 906                                    | Solobus (SN)   | 374.007        | 0                | 19.407  | 0                | 18.758  | 0                       | 17.783  | 0                       | 17.783  | 0                        |
| 907                                    | Solobus (SN)   | 573.025        | 0                | 29.823  | 0                | 29.185  | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 908                                    | Gelenkbus (GN) | 721.946        | 0                | 46.575  | 0                | 44.989  | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 909                                    | Gelenkbus (GN) | 1.089.104      | 0                | 67.698  | 0                | 65.804  | 0                       | 62.963  | 0                       | 62.963  | 0                        |
| 910                                    | Gelenkbus (GN) | 1.102.443      | 0                | 68.630  | 0                | 66.736  | 0                       | 63.263  | 0                       | 63.263  | 0                        |
| 916                                    | Gelenkbus (GN) | 466.296        | 0                | 28.178  | 0                | 27.982  | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 917                                    | Gelenkbus (GN) | 625.932        | 0                | 37.596  | 0                | 36.554  | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 920                                    | Gelenkbus (GN) | 1.556.181      | 0                | 93.360  | 0                | 91.392  | 0                       | 89.106  | 0                       | 89.106  | 0                        |
| 921                                    | Gelenkbus (GN) | 1.469.334      | 0                | 88.846  | 0                | 87.063  | 0                       | 85.026  | 0                       | 85.026  | 0                        |
| 922                                    | Solobus (SN)   | 601.423        | 0                | 33.070  | 0                | 32.303  | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 923                                    | Solobus (SN)   | 607.416        | 0                | 31.790  | 0                | 30.976  | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 924                                    | Solobus (SN)   | 620.746        | 0                | 32.661  | 0                | 31.594  | 0                       | 30.053  | 0                       | 30.053  | 0                        |
| 926                                    | Gelenkbus (GN) | 666.055        | 0                | 38.266  | 0                | 37.470  | 0                       | 36.422  | 0                       | 36.422  | 0                        |
| 928                                    | Solobus (SN)   | 249.696        | 0                | 11.884  | 0                | 11.536  | 0                       | 10.840  | 0                       | 10.840  | 0                        |
| 930                                    | Solobus (SN)   | 200.194        | 0                | 10.696  | 0                | 10.696  | 0                       | 10.458  | 0                       | 10.458  | 0                        |
| 931                                    | Solobus (SN)   | 198.982        | 0                | 11.003  | 0                | 11.000  | 0                       | 10.762  | 0                       | 10.762  | 0                        |
| 9331                                   | Solobus (SN)   | 213.067        | 0                | 12.416  | 0                | 12.099  | 0                       | 12.099  | 0                       | 12.099  | 0                        |
| 9332                                   | Gelenkbus (GN) | 605.222        | 0                | 39.223  | 0                | 38.528  | 0                       | 37.485  | 0                       | 37.485  | 0                        |
| 934                                    | Gelenkbus (GN) | 998.197        | 0                | 55.637  | 0                | 56.110  | 0                       | 55.621  | 0                       | 55.621  | 0                        |
| 935                                    | Solobus (SN)   | 354.347        | 0                | 18.438  | 0                | 18.107  | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 939                                    | Solobus (SN)   | 242.118        | 0                | 12.479  | 0                | 12.263  | 0                       | 12.047  | 0                       | 12.047  | 0                        |
| 940                                    | Solobus (SN)   | 506.776        | 0                | 28.192  | 0                | 26.781  | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 941                                    | Gelenkbus (GN) | 865.394        | 0                | 51.647  | 0                | 49.369  | 0                       | 46.989  | 0                       | 46.989  | 0                        |
| 942                                    | Solobus (SN)   | 656.656        | 0                | 35.069  | 0                | 32.392  | 0                       | 30.187  | 0                       | 30.187  | 0                        |
| Jährliche Menge an CO2-Emissionen [kg] |                | 16.626.806     | 0                | 955.980 | 0                | 932.068 | 0                       | 664.948 | 0                       | 664.948 | 0                        |

Tabelle 16: Zu erwartende jährliche Menge Treibhausgas (CO<sub>2</sub>), die die Busflotte der DVG je Linie verursacht<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Die aufsummierten Werte (unterste Zeile) für die Elektrobusszenarien sind nur theoretische Werte, da die gesamte Flotte sinnvoller Weise aus einem Flottenmix verschiedener Konzepte besteht, also nicht immer das gleiche Elektrobusskonzept für jede Linie ausgewählt werden sollte. Außerdem gehen die Linien, die nicht mit Gelegenheitsladern elektrifiziert werden können, mit Null in die entsprechende Summe ein. Daher dienen die aufsummierten Werte für die Elektrobusszenarien lediglich der Indikation einer groben Größenordnung.

## Wirtschaftlichkeit und Umweltwirkungen (Arbeitspaket 3)

| Linie                                 | Bustyp         | Dieselreferenz | NOX in g         |         |                  |         |                         |         |                         |         | Brennstoffzellenbus<br>C |
|---------------------------------------|----------------|----------------|------------------|---------|------------------|---------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|--------------------------|
|                                       |                |                | Depotlader Typ 1 |         | Depotlader Typ 2 |         | Gelegenheitslader Typ 1 |         | Gelegenheitslader Typ 2 |         |                          |
|                                       |                |                | A                | B       | A                | B       | A                       | B       | A                       | B       |                          |
| 40                                    | Solobus (SN)   | 47.541         | 0                | 1.800   | 0                | 1.775   | 0                       | 1.724   | 0                       | 1.724   | 0                        |
| 801                                   | Solobus (SN)   | 42.731         | 0                | 1.568   | 0                | 1.568   | 0                       | 1.568   | 0                       | 1.568   | 0                        |
| 802                                   | Gelenkbus (GN) | 35.618         | 0                | 1.947   | 0                | 1.924   | 0                       | 1.924   | 0                       | 1.924   | 0                        |
| 803                                   | Gelenkbus (GN) | 48.410         | 0                | 2.557   | 0                | 2.511   | 0                       | 2.488   | 0                       | 2.488   | 0                        |
| 804                                   | Solobus (SN)   | 24.429         | 0                | 890     | 0                | 890     | 0                       | 1.230   | 0                       | 1.230   | 0                        |
| 805                                   | Solobus (SN)   | 26.928         | 0                | 1.008   | 0                | 1.008   | 0                       | 1.023   | 0                       | 1.023   | 0                        |
| 806                                   | Gelenkbus (GN) | 25.328         | 0                | 1.340   | 0                | 1.317   | 0                       | 1.825   | 0                       | 1.825   | 0                        |
| 905                                   | Solobus (SN)   | 149.160        | 0                | 6.176   | 0                | 5.965   | 0                       | 5.649   | 0                       | 5.649   | 0                        |
| 906                                   | Solobus (SN)   | 152.428        | 0                | 6.283   | 0                | 6.073   | 0                       | 5.757   | 0                       | 5.757   | 0                        |
| 907                                   | Solobus (SN)   | 247.306        | 0                | 9.655   | 0                | 9.449   | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 908                                   | Gelenkbus (GN) | 254.356        | 0                | 15.079  | 0                | 14.565  | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 909                                   | Gelenkbus (GN) | 370.157        | 0                | 21.917  | 0                | 21.304  | 0                       | 20.384  | 0                       | 20.384  | 0                        |
| 910                                   | Gelenkbus (GN) | 372.268        | 0                | 22.219  | 0                | 21.606  | 0                       | 20.481  | 0                       | 20.481  | 0                        |
| 916                                   | Gelenkbus (GN) | 157.335        | 0                | 9.123   | 0                | 9.059   | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 917                                   | Gelenkbus (GN) | 205.899        | 0                | 12.172  | 0                | 11.834  | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 920                                   | Gelenkbus (GN) | 521.626        | 0                | 30.225  | 0                | 29.588  | 0                       | 28.848  | 0                       | 28.848  | 0                        |
| 921                                   | Gelenkbus (GN) | 498.354        | 0                | 28.764  | 0                | 28.187  | 0                       | 27.527  | 0                       | 27.527  | 0                        |
| 922                                   | Solobus (SN)   | 261.734        | 0                | 10.707  | 0                | 10.458  | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 923                                   | Solobus (SN)   | 252.361        | 0                | 10.292  | 0                | 10.029  | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 924                                   | Solobus (SN)   | 257.271        | 0                | 10.574  | 0                | 10.229  | 0                       | 9.730   | 0                       | 9.730   | 0                        |
| 926                                   | Gelenkbus (GN) | 214.157        | 0                | 12.388  | 0                | 12.131  | 0                       | 11.791  | 0                       | 11.791  | 0                        |
| 928                                   | Solobus (SN)   | 94.556         | 0                | 3.848   | 0                | 3.735   | 0                       | 3.509   | 0                       | 3.509   | 0                        |
| 930                                   | Solobus (SN)   | 87.212         | 0                | 3.463   | 0                | 3.463   | 0                       | 3.386   | 0                       | 3.386   | 0                        |
| 931                                   | Solobus (SN)   | 89.238         | 0                | 3.562   | 0                | 3.561   | 0                       | 3.484   | 0                       | 3.484   | 0                        |
| 9331                                  | Solobus (SN)   | 100.452        | 0                | 4.020   | 0                | 3.917   | 0                       | 3.917   | 0                       | 3.917   | 0                        |
| 9332                                  | Gelenkbus (GN) | 217.632        | 0                | 12.698  | 0                | 12.473  | 0                       | 12.136  | 0                       | 12.136  | 0                        |
| 934                                   | Gelenkbus (GN) | 326.687        | 0                | 18.013  | 0                | 18.166  | 0                       | 18.007  | 0                       | 18.007  | 0                        |
| 935                                   | Solobus (SN)   | 148.000        | 0                | 5.969   | 0                | 5.862   | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 939                                   | Solobus (SN)   | 101.769        | 0                | 4.040   | 0                | 3.970   | 0                       | 3.900   | 0                       | 3.900   | 0                        |
| 940                                   | Solobus (SN)   | 216.710        | 0                | 9.127   | 0                | 8.670   | 0                       | 0       | 0                       | 0       | 0                        |
| 941                                   | Gelenkbus (GN) | 283.513        | 0                | 16.721  | 0                | 15.983  | 0                       | 15.213  | 0                       | 15.213  | 0                        |
| 942                                   | Solobus (SN)   | 261.005        | 0                | 11.354  | 0                | 10.487  | 0                       | 9.773   | 0                       | 9.773   | 0                        |
| Jährliche Menge an NOX-Emissionen [g] |                | 6.092.172      | 0                | 309.499 | 0                | 301.757 | 0                       | 215.277 | 0                       | 215.277 | 0                        |

Tabelle 17: Zu erwartende jährliche Menge Stickoxide (NO<sub>x</sub>), die die Busflotte der DVG je Linie verursacht<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Die aufsummierten Werte (unterste Zeile) für die Elektrobus-Szenarien sind nur theoretisch Werte, da die gesamte Flotte sinnvoller Weise aus einem Flottenmix verschiedener Konzepte besteht, also nicht immer das gleiche Elektrobuskonzept für jede Linie ausgewählt werden sollte. Außerdem gehen die Linien, die nicht mit Gelegenheitsladern elektrifiziert werden können, mit Null in die entsprechende Summe ein. Daher dienen die aufsummierten Werte für die Elektrobus-Szenarien lediglich der Indikation einer groben Größenordnung.

| Linie                                | Bustyp         | Dieselreferenz | PM in g          |        |                  |        |                         |        |                         |        | Brennstoffzellenbus<br>C |
|--------------------------------------|----------------|----------------|------------------|--------|------------------|--------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|--------------------------|
|                                      |                |                | Depotlader Typ 1 |        | Depotlader Typ 2 |        | Gelegenheitslader Typ 1 |        | Gelegenheitslader Typ 2 |        |                          |
|                                      |                |                | A                | B      | A                | B      | A                       | B      | A                       | B      |                          |
| 40                                   | Solobus (SN)   | 1.822          | 0                | 540    | 0                | 532    | 0                       | 517    | 0                       | 517    | 0                        |
| 801                                  | Solobus (SN)   | 1.212          | 0                | 470    | 0                | 470    | 0                       | 470    | 0                       | 470    | 0                        |
| 802                                  | Gelenkbus (GN) | 1.310          | 0                | 584    | 0                | 577    | 0                       | 577    | 0                       | 577    | 0                        |
| 803                                  | Gelenkbus (GN) | 2.023          | 0                | 767    | 0                | 753    | 0                       | 747    | 0                       | 747    | 0                        |
| 804                                  | Solobus (SN)   | 774            | 0                | 267    | 0                | 267    | 0                       | 369    | 0                       | 369    | 0                        |
| 805                                  | Solobus (SN)   | 754            | 0                | 302    | 0                | 302    | 0                       | 307    | 0                       | 307    | 0                        |
| 806                                  | Gelenkbus (GN) | 944            | 0                | 402    | 0                | 395    | 0                       | 547    | 0                       | 547    | 0                        |
| 905                                  | Solobus (SN)   | 4.479          | 0                | 1.853  | 0                | 1.790  | 0                       | 1.695  | 0                       | 1.695  | 0                        |
| 906                                  | Solobus (SN)   | 4.690          | 0                | 1.885  | 0                | 1.822  | 0                       | 1.727  | 0                       | 1.727  | 0                        |
| 907                                  | Solobus (SN)   | 7.185          | 0                | 2.897  | 0                | 2.835  | 0                       | 0      | 0                       | 0      | 0                        |
| 908                                  | Gelenkbus (GN) | 9.052          | 0                | 4.524  | 0                | 4.370  | 0                       | 0      | 0                       | 0      | 0                        |
| 909                                  | Gelenkbus (GN) | 13.656         | 0                | 6.575  | 0                | 6.391  | 0                       | 6.115  | 0                       | 6.115  | 0                        |
| 910                                  | Gelenkbus (GN) | 13.823         | 0                | 6.666  | 0                | 6.482  | 0                       | 6.144  | 0                       | 6.144  | 0                        |
| 916                                  | Gelenkbus (GN) | 5.847          | 0                | 2.737  | 0                | 2.718  | 0                       | 0      | 0                       | 0      | 0                        |
| 917                                  | Gelenkbus (GN) | 7.848          | 0                | 3.652  | 0                | 3.550  | 0                       | 0      | 0                       | 0      | 0                        |
| 920                                  | Gelenkbus (GN) | 19.513         | 0                | 9.068  | 0                | 8.876  | 0                       | 8.654  | 0                       | 8.654  | 0                        |
| 921                                  | Gelenkbus (GN) | 18.424         | 0                | 8.629  | 0                | 8.456  | 0                       | 8.258  | 0                       | 8.258  | 0                        |
| 922                                  | Solobus (SN)   | 7.541          | 0                | 3.212  | 0                | 3.137  | 0                       | 0      | 0                       | 0      | 0                        |
| 923                                  | Solobus (SN)   | 7.616          | 0                | 3.088  | 0                | 3.009  | 0                       | 0      | 0                       | 0      | 0                        |
| 924                                  | Solobus (SN)   | 7.783          | 0                | 3.172  | 0                | 3.069  | 0                       | 2.919  | 0                       | 2.919  | 0                        |
| 926                                  | Gelenkbus (GN) | 8.351          | 0                | 3.717  | 0                | 3.639  | 0                       | 3.537  | 0                       | 3.537  | 0                        |
| 928                                  | Solobus (SN)   | 3.131          | 0                | 1.154  | 0                | 1.120  | 0                       | 1.053  | 0                       | 1.053  | 0                        |
| 930                                  | Solobus (SN)   | 2.510          | 0                | 1.039  | 0                | 1.039  | 0                       | 1.016  | 0                       | 1.016  | 0                        |
| 931                                  | Solobus (SN)   | 2.495          | 0                | 1.069  | 0                | 1.068  | 0                       | 1.045  | 0                       | 1.045  | 0                        |
| 9331                                 | Solobus (SN)   | 2.672          | 0                | 1.206  | 0                | 1.175  | 0                       | 1.175  | 0                       | 1.175  | 0                        |
| 9332                                 | Gelenkbus (GN) | 7.589          | 0                | 3.810  | 0                | 3.742  | 0                       | 3.641  | 0                       | 3.641  | 0                        |
| 934                                  | Gelenkbus (GN) | 12.516         | 0                | 5.404  | 0                | 5.450  | 0                       | 5.402  | 0                       | 5.402  | 0                        |
| 935                                  | Solobus (SN)   | 4.443          | 0                | 1.791  | 0                | 1.759  | 0                       | 0      | 0                       | 0      | 0                        |
| 939                                  | Solobus (SN)   | 3.036          | 0                | 1.212  | 0                | 1.191  | 0                       | 1.170  | 0                       | 1.170  | 0                        |
| 940                                  | Solobus (SN)   | 6.354          | 0                | 2.738  | 0                | 2.601  | 0                       | 0      | 0                       | 0      | 0                        |
| 941                                  | Gelenkbus (GN) | 10.851         | 0                | 5.016  | 0                | 4.795  | 0                       | 4.564  | 0                       | 4.564  | 0                        |
| 942                                  | Solobus (SN)   | 8.234          | 0                | 3.406  | 0                | 3.146  | 0                       | 2.932  | 0                       | 2.932  | 0                        |
| Jährliche Menge an PM-Emissionen [g] |                | 208.479        | 0                | 92.850 | 0                | 90.527 | 0                       | 64.583 | 0                       | 64.583 | 0                        |

 Tabelle 18: Zu erwartende jährliche Menge Feinstaub (PM), die die Busflotte der DVG je Linie verursacht<sup>8</sup>

Dieselsebusse der Abgasnorm Euro VI führen für alle Linien in Duisburg in Summe zu CO<sub>2</sub>-Emissionen von rund 16.600 t pro Jahr. Batteriebusse mit Verwendung eines fossilen Zuheizers emittieren etwa 932 t CO<sub>2</sub> pro Jahr. Die Dieselsebusse erzeugen in Duisburg 6,1 t Stickoxide pro Jahr. Die fossilen Zuheizers der Batteriebusse stoßen etwa 215 kg Stickoxide pro Jahr aus. An Feinstaub entstehen bei entsprechendem Dieselsebuseinsatz in Duisburg ca. 208 kg pro Jahr, bei Einsatz von Batteriebusen mit fossilem Zuheizers rund 75 kg. Die genauen Emissionen hängen von der Wahl des Konzeptes für die einzelnen Linien ab. Die sich nach der Auswahl des Elektrifizierungskonzeptes je Linie entsprechend Empfehlung ergebenden Emissionen werden in Kapitel 4.5 aggregiert und vorgestellt.

<sup>8</sup> Die aufsummierten Werte (unterste Zeile) für die Elektrobus-Szenarien sind nur theoretisch Werte, da die gesamte Flotte sinnvoller Weise aus einem Flottenmix verschiedener Konzeptes besteht, also nicht immer das gleiche Elektrobuskonzept für jede Linie ausgewählt werden sollte. Außerdem gehen die Linien, die nicht mit Gelegenheitsladern elektrifiziert werden können, mit Null in die entsprechende Summe ein. Daher dienen die aufsummierten Werte für die Elektrobus-Szenarien lediglich der Indikation einer groben Größenordnung.

## 4. Umstellungskonzept (Arbeitspaket 4)

In Arbeitspaket 4 werden zunächst linienübergreifenden Empfehlungen und darauf aufbauend ein Umstellungskonzept für das Netz der DVG erarbeitet. Anknüpfend an die technischen (AP 2) und wirtschaftlichen Analysen (AP 3) werden der Reifegrad der Technik und mögliche Fördermaßnahmen diskutiert. Anschließend erfolgt eine detaillierte Beschreibung der schrittweisen Elektrifizierung der DVG-Flotte. Das Umstellungskonzept ist dazu in Phasen unterteilt. Neben der Kostenbetrachtung für jede Phase werden auch die Umweltwirkungen abgebildet.

### 4.1 Linienübergreifende Empfehlungen

Im Rahmen der technischen und betrieblichen Analyse und der nachgelagerten Wirtschaftlichkeitsrechnung wurden vielversprechende technische Lösungen identifiziert und hinsichtlich Aufwand (TCO) bewertet. Aufbauend auf den in AP3 linienspezifisch ermittelten Kostenzahlen wurden linienübergreifende Empfehlungen abgeleitet. Neben der Minimierung der TCO und des Fahrzeugbedarfs (Fahrzeugmehrbedarf gegenüber Dieselbus-Referenz) waren dabei die wesentlichen Kriterien:

- Reduktion der Anzahl der unterschiedlichen Fahrzeugvarianten (Fahrzeuge können auf verschiedenen Linien eingesetzt werden; keine linienspezifischen Sonderlösungen)
- Ausnutzung von Synergien zwischen den Linien
- Bereitstellung einer ausreichenden Anzahl flexibel einsetzbarer Fahrzeuge (Depotlager) zur Abdeckung der Nachtlinien

Die Empfehlungen wurden hierbei auf Basis der TCO ohne Förderung hergeleitet. Der Grund hierfür ist, dass viele Förderprogramme für Elektrobusse und insbesondere für Batteriebusse angekündigt sind, allerdings keine Gewissheit über die gesicherte Förderhöhe und die Verfügbarkeit der Gelder besteht. Die Fördermittel sind also nicht gesichert abrufbar, sondern erfordern werden in einem Wettbewerbsverfahren vergeben. Mögliche Fördermöglichkeiten und ihre Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit von Elektrobussen werden in Kapitel 4.3 vorgestellt.

Für die Ermittlung der Umstellungsempfehlungen wurde anschließend das wirtschaftlichste technische Konzept ausgewählt. Falls die Elektrifizierung einer Linie mit weiterentwickelter Technik mit deutlich geringerem Aufwand geschehen kann, wurde die Umstellung zeitlich zurückgestellt.

Als erste Maßnahme der Variantenminimierung wurde der fossile Zuheizung für alle Fahrzeuge gewählt. Insgesamt lässt sich mit dem fossilen Zuheizung (Hybridheizung) ein deutlich besser kalkulierbarer Betrieb im Betrachtungszeitraum gewährleisten, weil extreme Temperaturen in einzelnen Jahren durch den Zuheizung und nicht durch die Batteriereserve ausgeglichen werden müssen. Darüber hinaus ermöglicht die Verwendung eines fossilen Zuheizers bei manchen

Linien eine Reduzierung der Fahrzeuganzahl, was nicht nur hinsichtlich Anfangsinvestitionen und betrieblichem Mehraufwand, sondern auch in Hinblick auf das limitierte Platzangebot im Betriebshof ein großer Vorteil ist. Gleichzeitig sind die durch den fossilen Zuheizung verursachten Emissionen im Vergleich zu den Einsparungen gegenüber der Dieselreferenz gering. Die Verwendung von unterschiedlichen Heizkonzepten ergibt aus Flottensicht nur begrenzt Sinn, da die Busse dadurch deutlich unflexibler auf die Linien verteilt werden könnten.

Weiterhin wurde für alle Linien die Wahl auf die Fahrzeugvarianten Gelegenheitslader Typ 1 und Depotlader Typ 2 reduziert. Die Verwendung von Gelegenheitsladern Typ 2 führt potentiell für nur eine Linie zu wesentlichen betrieblichen Vorteilen: Linie 941 profitiert von einer Ladeleistung von 450 kW an der Endstelle Ehinger Berg, da in diesem Fall – anders als bei Typ 1 – auf Ladeinfrastruktur an der Endstelle Wolfssee verzichtet werden kann<sup>9</sup>. Zu beachten ist, dass sich die Batteriegröße von Typ 1 und von Typ 2 nicht unterscheidet, man somit also keine linienspezifische Sonderlösung hinsichtlich der Fahrzeuge hätte. Grundsätzlich für alle Linien ist zu beachten, dass eine höhere Ladeleistung kürzere Ladezeiten ermöglichen kann, was einen Zugewinn an Einsatzflexibilität bedeuten kann. Von einer Verwendung des Depotlader Typ 1 wurde abgesehen, da dieser ohnehin für keine Linie wesentliche wirtschaftliche Vorteile gebracht hätte, und Depotlader Typ 2 aufgrund der größeren Batterie mehr Einsatzflexibilität für unvorhergesehene Einsätze bietet.

Abbildung 34 zeigt die Legende für die nachfolgende Übersicht der linienübergreifenden Empfehlungen (siehe Abbildung 35). Es wird zwischen regulären Linien (Taglinien) und Nachtlinien sowie zwischen Solo- und Gelenkbussen visuell unterschieden. Zudem sind der konzeptspezifische Fahrzeugbedarf und mögliche Ladestandorte (im Falle von Gelegenheitsladern) für jede Linie vermerkt.

---

<sup>9</sup> Die geplanten Anpassungen an Linie 941 (siehe Kapitel 1.7) könnten dazu führen, dass an Wolfssee statt an Ehinger Berg nachgeladen werden sollte.

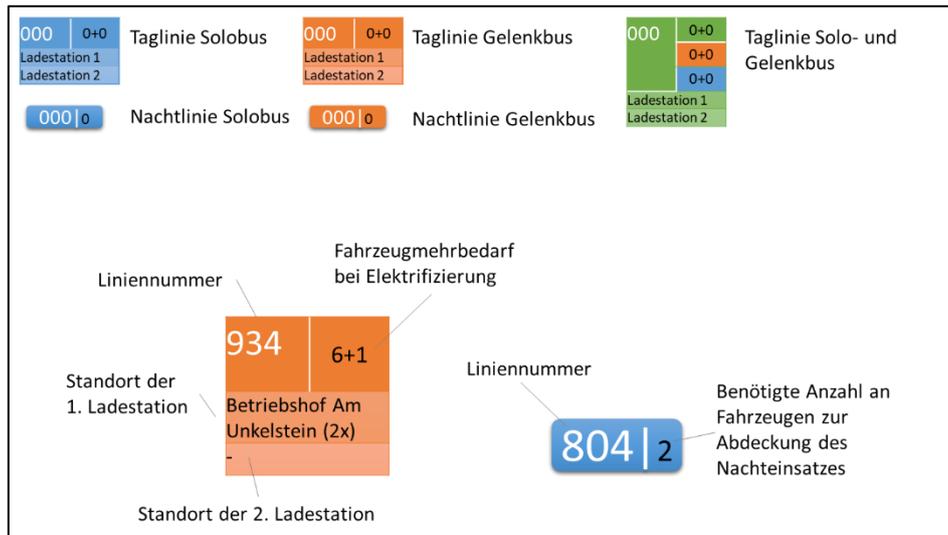


Abbildung 34: Legende der konzeptspezifischen Linieneigenschaften

Abbildung 35 zeigt die Übersicht aller linienübergreifenden Empfehlungen. Da der Umstellungsprozess einer ganzen Flotte nur schrittweise über mehrere Jahre erfolgen kann und bestimmte Linien von einer fortgeschrittenen Technik profitieren könnten, wird hier eine Trennung zwischen einer Elektrifizierung von 2020 bis 2025 mit aktueller Technik und ab 2026 mit fortgeschrittener Technik vorgenommen. Im Vorfeld einer Umsetzung des zweiten Zeitraums sollte allerdings eine Neubewertung des technischen Fortschritts und ein Abgleich mit den getroffenen Annahmen durchgeführt werden.

| BUSTYP                         | Zeitraum I: 2020 – 2025 (aktuelle Technologie) |  |  |   | Zeitraum II: ab 2026 (Szenario+6)     |                                       |                                      |                              |   |
|--------------------------------|--|--|--|---|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|---|
| <b>Depotlader Typ 2</b>        |  |  |  |   | 907   5+1                             | 922/923   10+2                        | 908   6+1                            |                              |   |
|                                |  |  |  |   | 935   3+1                             | 801   3                               | 916/917   7+2                        |                              |   |
|                                |  |  |  |   | 940   4+1                             | 804   2                               |                                      | 802   2                      |   |
|                                |  |  |  |   |                                       | 805   2                               |                                      | 803   3                      |   |
|                                |  |  |  |   |                                       |                                       |                                      | 806   2                      |   |
| <b>Gelegenheitslader Typ 1</b> | 40   2+0<br>Duisburg Hbf Osteingang            | 905/906   6+0<br>Marxloh Pollmann (2x) | 933   9+0<br>6+0<br>3+0<br>Uni Nord (2x) | 934   6+1<br>Betriebshof Am Unkelstein (2x) | 920   9+2<br>Kaldenhausen Krölls (2x) | 924   5+0<br>Winkelhausen Bruchstraße | 930/931   4+0<br>Schnabelhuck (2x) * | 941   7+0<br>Ehinger Berg ** | 921   9+1<br>Duisburg HBF Osteingang (2x) |
|                                | 928   2+0<br>Winkelhausen Bruchstraße          | 942   5+0<br>Ehinger Berg (2x)         |  | 909/910   13+1<br>Landschaftspark Nord (4x) | 926   4+1<br>Uni Nord (2x)            |                                       |                                      |                              |   |
|                                | 939   2+0<br>Duisburg Hbf Osteingang           |  |  |   |                                       |                                       |                                      |                              |   |

Abbildung 35: Übersicht der linienübergreifenden Empfehlungen,

- \*: Endstelle Schnabelhuck ist für die Errichtung von Ladeinfrastruktur nicht geeignet, deswegen muss die Endstelle der Ringlinie geändert werden
- \*\* : Für Linie 941 wird eine Ladeleistung von 450 kW benötigt

Für das Bedienungsgebiet in Duisburg hat sich Gelegenheitsladung als geeignetes Konzept für viele Linien herausgestellt. Aus diesem Grund werden im ersten Zeitraum nur Linien umgestellt, die sich mit Gelegenheitsladung (fast) ohne Fahrzeugmehrbedarf elektrifizieren lassen. Dadurch kann die Anzahl der durch die Elektrifizierung zusätzlich benötigten Fahrzeuge im Betriebshof stark begrenzt werden. Somit kann ausgenutzt werden, dass eine hohe Fahrleistung effizient elektrifiziert werden kann, solange noch eine Restflotte aus Dieselnissen besteht und somit Flexibilität für Sonderfälle bereitstellt. Überdies bietet es für den zweiten Zeitraum die Flexibilität, die bis dato nicht elektrifizierten Linien künftig einer erneuten Evaluation zu unterziehen, um den neuen Stand der Technik und gewonnene Erfahrungen auf diesem Gebiet in neue Konzepte einfließen zu lassen. Im zweiten Zeitraum werden alle Linien umgestellt, bei denen Gelegenheitsladung nicht möglich ist oder zu einem erhöhten Fahrzeugbedarf führt.

Linie 930/931 ist mit Gelegenheitsladung wirtschaftlicher zu elektrifizieren als mit Depotladung. Bei letzterem wird mindestens ein zusätzliches Fahrzeug nötig. Die derzeitige Endstelle in Schnabelhuck eignet sich jedoch nicht als Ladeort (siehe Kapitel 1.3). Aus diesem Grund würde bei dieser Ringlinie die zurzeit ohnehin diskutierte Verlegung der Endstelle auf eine

bisherige Unterwegshaltestelle vorteilhaft sein, wenn dadurch ein Ladeort auf der Linie eingerichtet werden kann. Auch die in der Ergänzung zum 3. NVP geplante Verlängerung des Linienwegs (siehe Kapitel 1.7) würde durch den höheren Energieverbrauch der Linienfahrten tendenziell weiter für Gelegenheitsladung sprechen. Falls es nicht möglich sein sollte, eine Haltestelle als Endstelle auszuwählen, an der die Fahrzeuge geladen werden könnten, würde zwar Depotlader Typ 1 NV-B das wirtschaftlichste verbleibende Elektrifizierungskonzept sein, allerdings Depotlader Typ 2 NV-B in Hinblick auf Vermeidung von linienspezifischen Sonderlösungen das zu empfehlende Konzept sein (5 Cent pro Nutzkilometer teurer als der entsprechende Typ 1).

Für Linie 941 reichen 300 kW Ladeleistung (Gelegenheitslader Typ 1) an der Endstelle Ehinger Berg bei konservativer Abschätzung knapp nicht aus, um den Energieverbrauch über den Tag auszugleichen. Daher ist, wie oben bereits erwähnt, in diesem Fall eine höhere Ladeleistung sinnvoll, um auf andere Ladeorte verzichten zu können. Entsprechend der in dieser Studie gewählten Kategorien wäre dies 450 kW (Gelegenheitslader Typ 2). Allerdings reichen auch bereits 360 kW Ladeleistung aus, um den Energieverbrauch über den Tag auszugleichen (siehe Gelegenheitslader Typ 1 NV-B im Zukunftsszenario „+6 Jahre“). An dieser Stelle ist zu beachten, dass die in Kapitel 1.7 genannte Erweiterung der Linie tendenziell Gelegenheitsladung weiter befürworten wird, da der Energieverbrauch der Linienfahrten ansteigen und die Endstelle im Westen in größere Entfernung vom Betriebshof rückt. Allerdings führt diese Erweiterung auch dazu, dass Ehinger Berg nicht mehr die Endstelle im Westen ist und somit als Ladeort ausscheidet. Sofern sich die neue Endstelle nicht als Ladeort eignet, könnte die Endstelle im Osten, Wolfssee, stattdessen als Ladeort in Frage kommen (siehe auch Tabelle 22). In jedem Fall würden Synergien an der Endstelle Ehinger Berg als gemeinsamem Ladeort mit Linie 942 wegfallen.

Im Folgenden wird die Flottenzusammensetzung bei einer vollständigen Umstellung gezeigt. Hierbei ist zu beachten, dass die derzeit erbrachte Fahrleistung von Fremdunternehmen der DVG miteinbezogen sind. Es findet allerdings in diesem Abschnitt keine Betrachtung der Reserve statt. Dies bedeutet, dass die auf dem Betriebshof aktuell vorgehaltenen Reservefahrzeuge nicht miteinbezogen wurden. Die Anzahl der Busse der Dieselbusreferenz weicht deshalb von der tatsächlichen Anzahl der aktuell abgestellten Dieselbusse der DVG ab und ist nicht ohne weiteres vergleichbar.

Tabelle 19 zeigt die Auswirkungen einer vollständigen Umstellung auf Elektrobusse für den Betriebshof Am Unkelstein. Insgesamt kommen 56 Solobusse und 76 Gelenkbusse für die betrachteten Linien zum Einsatz. Dies entspricht einem Zuwachs von fünf Solobussen und neun Gelenkbussen verglichen mit der Dieselbusreferenz. Für den Betrieb der Gelegenheitslader wird Ladeinfrastruktur an den Endstellen Betriebshof Am Unkelstein, Duisburg Hbf (Osteingang), Winkelhausen Bruchstraße, Marxloh Pollmann, Landschaftspark Nord, Uni Nord, Kaldenhausen Krölls und Ehinger Berg benötigt. Bei der Linie 930/931 muss noch eine geeignete

Haltestelle identifiziert werden, an der Ladeinfrastruktur gebaut werden kann und die Fahrzeuge laden können.

| Betriebshof Am Unkelstein | Anzahl Solobusse | Anzahl Gelenkbusse | SUMME |
|---------------------------|------------------|--------------------|-------|
| Depotlader Typ 2          | 27               | 16                 | 43    |
| Gelegenheitslader Typ 1   | 29               | 60                 | 89    |
| <b>SUMME</b>              | 56               | 76                 | 132   |
| SUMME Dieselbusse         | 51               | 67                 | 118   |

Tabelle 19: Fahrzeuganzahl im Betriebshof Am Unkelstein bei vollständiger Umstellung (Fremdleistung von anderen Unternehmen inbegriffen, ohne Reservebetrachtung)

## 4.2 Reifegrad der Technik

Bislang sind Elektrobusse noch kein Standardprodukt und werden nicht in großen Stückzahlen gefertigt. Die aktuelle Vielfalt an Herstellern auf dem Markt ist begrenzt. Insbesondere die Marktführer EvoBus und MAN halten sich noch zurück und haben erste vollelektrisch betriebene Fahrzeuge erst für 2019 bzw. 2020 angekündigt. Das Angebot variiert zudem in Abhängigkeit von der Fahrzeugkategorie, wie in Kapitel 1.2.1 beschrieben wurde. Beispielsweise ist die Verfügbarkeit von Gelenkbussen mit Batteriekapazitäten von über 300 kWh (Depotlader Typ 2) zum aktuellen Zeitpunkt auf einzelne Hersteller beschränkt.

Trotzdem ist in den kommenden Jahren durch die wachsende Nachfrage und durch zukünftige Fördermaßnahmen für Elektromobilität im ÖPNV ein höheres Angebot an unterschiedlichen Batteriebuskategorien zu erwarten. Bei der Definition der Umstellungsphasen ist daher eines der Kriterien, dass zum Zeitpunkt der Ausschreibung mehrere Hersteller den gewählten Fahrzeugtyp anbieten müssen.

Unter Berücksichtigung der geringen Verfügbarkeit an Erfahrungen aus Feldversuchen und der relativ zum Dieselbus noch wenig erprobten Technik wird zu Beginn der Umstellungen, d.h. für die Umstellung der ersten Linie (Kapitel 4.4) eine Verfügbarkeit für den Linienbetrieb mit Elektrobussen angenommen, welche um 15 % niedriger liegt als die der Dieselreferenz. Die Verfügbarkeit sollte sich zukünftig bei steigender Erfahrung und steigendem Angebot erhöhen, sodass für die darauffolgenden Umstellungsphasen von einem ähnlichen Reservebedarf ausgegangen wird, wie für die Dieselreferenz. Um einen problemlosen und unkomplizierten Reservebetrieb zu gewährleisten, eignen sich für den elektrischen Linienbetrieb weiterhin Dieselbusse als Reservefahrzeuge.

### 4.3 Fördermöglichkeiten

Die TCO der Elektrobuskonzepte sind ungeachtet der Technologiewahl deutlich höher als der Dieselreferenz. Aus diesem Grund bedarf die Umstellung einer finanziellen Förderung. Bei der Diskussion von konkreten Umsetzungsszenarien und deren Förderung ist die Unterscheidung zwischen Anfangsinvestition und TCO notwendig. Die Förderung bezieht sich nur auf die Anfangsinvestition, während die Wirtschaftlichkeit der Konzepte aus der TCO resultiert.

#### **Förderfähige Ausgaben**

Die Förderprogramme beziehen sich in der Regel auf die Investitionsmehrkosten gegenüber einem Dieselsystem. Diese setzen sich zusammen aus Fahrzeugmehrkosten, d.h. aus der Differenz der Anschaffungskosten von Elektrobuss einschließlich erstem Batteriesatz und Dieselsbus. Zu beachten ist, dass für jeden Elektrobuss nur die Mehrkosten gegenüber einem Dieselsbus förderfähig sind. Falls zur Erbringung der gleichen Fahrleistung ein oder mehrere Elektrobusse mehr nötig sind, als Dieselsbusse benötigt werden, sind diese Elektrobusse dennoch nicht zu 100 % mit ihrem Kaufpreis ansetzbar, sondern dürfen nur mit ihren Mehrkosten gegenüber einem entsprechenden Dieselsbus angesetzt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, die Investitionskosten für Ladeinfrastruktur, bei einigen Programmen mit und bei einigen ohne die Kosten für den Netzanschluss, vollständig anrechnen zu lassen. Im Falle von Brennstoffzellenbussen wird zusätzlich die Subvention der Differenz der Anfangsinvestition von Wasserstofftankstelle inklusive Elektrolyseur und Dieseltankstelle angeboten.

Nicht förderfähig sind aktuell die Beschaffungskosten für weitere Batteriesätze bzw. Brennstoffzellensysteme. Daher werden mit Blick auf eine Förderung Elektrobuskonzepte mit größeren Batteriekapazitäten (bspw. Depotlader Typ 2) aufgrund der höheren Lebensdauer gegenüber Konzepten mit kleineren Batteriekapazitäten (bspw. Depotlader Typ 1) vorteilhaft (die in etwa gleichbleibende Belastung verteilt sich auf ein größeres Batteriesystem, so dass die Belastung in Relation zur Batteriegröße also kleiner wird).

#### **Förderprogramme**

Aktuell bietet das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) mit der angepassten „Förderrichtlinie Elektromobilität“ vom 05.12.2017 eine maximale Förderhöhe von 40 % für Elektrobussysteme (Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur ohne Netzanschlusskosten) an. Die Anmeldefrist für den letzten in dieser Förderrichtlinie erschienenen Aufruf (15.12.2017) endete am 31.01.2018, allerdings wurde ein weiterer für das Frühjahr 2018 unverbindlich in Aussicht gestellt. Für Städte und Kommunen wird eine Förderquote von 75 % angesetzt. Für Städte und Kommunen, für welche eine Maßnahme zur Haushaltssicherung greift, sind 90 % möglich. An dieser Stelle ist zu beachten, dass nicht eindeutig geklärt ist, wie kommunale Verkehrsbetriebe, welche eine Direktbeauftragung für die Fahrleistung erhalten und somit nicht in Wettbewerb zu anderen Busbetreibern stehen, seitens des Fördergebers

behandelt werden, d.h. ob sie mit dem höheren Satz von maximal 75 % bzw. 90 % gefördert werden, oder mit dem niedrigeren Satz von maximal 40 %.

Im Rahmen der „Förderrichtlinie für Maßnahmen zur Marktaktivierung“ (Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie NIP Phase 2) vom 18.10.2017 fördert das BMVI ebenfalls Brennstoffzellenbusse im ÖPNV. Die Förderhöhe von 40 % schließt die Wasserstoffinfrastruktur und -tankstelle ebenfalls mit ein.

Seitens des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) wurde eine Förderinitiative für Anfang 2018 angekündigt. Die Initiative des BUMB wird durch den Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH betreut. Das Programm soll einen Umfang von rund 35 Mio. € haben und über mehrere Jahre laufen. Für das Jahr 2018 ist bundesweit ein Fördervolumen von rund 5 Mio. € vorgesehen. Es wurde angekündigt, dass dieses Budget aus Mitteln des Sofortprogramms Saubere Luft aufgestockt werden soll. Unbestätigten Informationen nach ist eine Aufstockungssumme von 120 Mio. € geplant. Die Fördervorhaben müssen mindestens 6 Busse umfassen. Gefördert werden bis zu 80 % der Mehrkosten je Bus und bis zu 40 % der Ladeinfrastruktur (inkl. Netzanschlusskosten). Darüber hinaus werden Beratungsleistungen gefördert.

Weiterhin fördert das Land NRW gemäß §13 des ÖPNVG NRW Elektrobuskonzepte. Die Mehrkosten von Elektrobussen zu Dieselbussen (Euro IV) werden zu 60 % gefördert. Die zuwendungsfähigen Ausgaben für Ladestationen sowie spezifische Werkstatteinrichtungen werden bis zu 90 % gefördert. Die Zweckbindung beträgt hierbei 8 Jahre, für Werkstatteinrichtung 20 Jahre. Zuständig für die Abwicklung ist der Verkehrsverbund Rhein-Ruhr (VRR). Um eine Bewilligung der Mittel noch für 2018 zu erreichen, müssen die Vorhaben bis Ende März vollständig angemeldet sein.

Zu beachten ist allerdings, dass es sich in all diesen Programmen nicht um eine gesicherte Förderung handelt, sondern die Antragsteller sich im Wettbewerb befinden. Diskussionen über Förderungen sind außerdem immer unter der Maßgabe zu führen, dass die tatsächlichen Förderhöhen und die langfristige Verfügbarkeit der genannten Förderprogramme nicht gesichert sind. Insbesondere für Beschaffungen, die weit in der Zukunft liegen, ist eine Fördermöglichkeit ungewiss.

#### 4.4 Umstellung der ersten Linie

In Anbetracht der benötigten Vorlaufzeit für die Akquisition und Bewilligung von Fördermitteln sowie der langen Lieferzeit der Elektrobusse erscheint die Aufnahme des elektrischen Linienbetriebs ab 2020 realistisch (siehe Abbildung 36). Dies bietet potentiell die Möglichkeit, bei Erscheinen des Förderprogramms des BMUB und ggf. noch den für Frühjahr 2018 in Aussicht gestellten nächsten Aufruf der Förderrichtlinie Elektromobilität des BMVI wahrzunehmen.

## Umstellungskonzept (Arbeitspaket 4)

|                   |  | 17  | 2018 |          |     |          |     |     |     |     |     |     |     |          | 2019 |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     | 2020 |     |     |     |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------------------|--|-----|------|----------|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|------|-----|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Umsetzungsschritt |  | Dez | Jan  | Feb      | Mrz | Apr      | Mai | Jun | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez      | Jan  | Feb | Mrz | Apr | Mai | Jun       | Jul | Aug | Sep | Okt | Nov | Dez | Jan  | Feb | Mrz | Apr | Mai |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1                 | Konzeptvorstellung und Beschlussfassung in Gremien   |     |      |          |     |          |     |     |     |     |     |     |     |          |      |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 2                 | Fördermittel beantragen                              |     |      | 3 Monate |     |          |     |     |     |     |     |     |     |          |      |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 3                 | Förderbescheid abwarten                              |     |      |          |     | 6 Monate |     |     |     |     |     |     |     |          |      |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 4                 | Ausschreibung vorbereiten                            |     |      |          |     |          |     |     |     |     |     |     |     |          |      |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 5                 | Ausschreibung durchführen                            |     |      |          |     |          |     |     |     |     |     |     |     | 6 Monate |      |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 6                 | Lieferzeit Elektrobusse und Aufbau Ladeinfrastruktur |     |      |          |     |          |     |     |     |     |     |     |     |          |      |     |     |     |     | 12 Monate |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 7                 | Aufnahme Liniendienst und Betrieb der Elektrobusse   |     |      |          |     |          |     |     |     |     |     |     |     |          |      |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |      |     |     |     |     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Abbildung 36: Zeitplan für die frühestmögliche Umstellungsphase

Für die Umstellung in der ersten Phase in 2020 wird Linie 934 mit Gelegenheitslader Typ 1 empfohlen. Auf Linie 934 können Busse in Gelegenheitsladung erprobt werden. Dies ist in Hinblick auf eine spätere Elektrifizierung des gesamten Netzes von Vorteil, da sich Gelegenheitsladung für das DVG-Bedienungsgebiet als sehr geeignet herausgestellt hat. Linie 934 umfasst dabei sieben Elektrobusse. Grundsätzlich können die Busse auch auf anderen Linien mit kurzer Umlauflänge eingesetzt werden. Linie 934 verläuft durch die gesamte Stadt (Innenhafen, Innenstadt, Hauptbahnhof, usw.) und ermöglicht deswegen eine große Sichtbarkeit. Dadurch können bereits in der ersten Phase viele Fahrgäste die Elektrobusse in Duisburg testen. Eine Endstelle der Linien liegt in unmittelbarer Nähe zum Betriebshof. Deswegen kann die Infrastruktur für Schnellladung der Busse auf dem Betriebshof errichtet werden. Somit kann also das Konzept der Gelegenheitsladung erprobt werden, ohne dass Ladeinfrastruktur im öffentlich zugänglichen Raum installiert werden muss. Die Infrastruktur muss nur auf dem Betriebshof errichtet werden und kann deshalb auch einfacher gewartet und repariert werden. Die „Schnell“-Ladestationen können darüber hinaus später als Reserve für eine Elektrifizierung des gesamten Netzes genutzt werden. Insgesamt erscheint somit der Ertrag im Verhältnis zum infrastrukturellen Aufwand sehr hoch. Gelenkbusse in Gelegenheitsladung mit einer Ladeleistung von 300 kW und einer Batteriekapazität von etwa 200 kWh sind heute schon auf dem Markt verfügbar. Tabelle 20 zeigt Rahmendaten einer Elektrifizierung der Linie 934.

|   |   |
|---|---|
| <b>Phase A</b>  |   |
| <b>Reguläre Linien</b>  | 934                                       |
| <b>Betriebshof</b>  | Am Unkelstein                             |
| <b>Gefäßgröße</b>   | Gelenkbus                                 |
| <b>E-Buskonzept</b>   | Gelegenheitslader Typ 1                   |
| <b>Heizkonzept</b>  | Hybrid (elektrisch + Brennstoff-Zuheizer) |
| <b>Anzahl Elektrobusse</b>  | 7   |
| <b>Reale Batteriekapazität</b>                                      | 220 kWh                                   |
| <b>Nutzbare Batteriekapazität</b>                                   | 132 kWh                                   |
| <b>Batterieaustausch alle</b>                                       | 6 Jahre                                   |
| <b>Ort Schnelladestationen</b>                                      | Betriebshof am Unkelstein                 |
| <b>Anzahl Schnelladestationen</b>                                   | 2   |
| <b>Ladeleistung für die Schnelladestationen</b>                     | 300 kW                                    |
| <b>Anz. Ladestationen (Langsamladung über Nacht) im Betriebshof</b> | mind. 2                                   |
| <b>Benötigte Ladeleistung pro Ladestation (Langsamladung)</b>       | 80 kW                                     |
| <b>Linien-km (Nutzkilometer) pro Jahr</b>                           | 543.238 km                                |
| <b>Gesamtfahrleistung pro Jahr</b>                                  | 560.175 km                                |
| <b>Gesamtenergie pro Jahr</b>                                       | 1.139.126 kWh                             |
| <b>Verbrauch Zuheizer pro Jahr</b>                                  | 18.728 l                                  |
| <b>Zusätzliche Fahrzeit pro Tag</b>                                 | 0,2 h                                     |
| <b>Einsparung CO<sub>2</sub> pro Jahr</b>                           | 943 t                                     |
| <b>Einsparung NO<sub>x</sub> pro Jahr</b>                           | 309 kg                                    |
| <b>Einsparung Feinstaub pro Jahr</b>                                | 7 kg                                      |

Tabelle 20: Betriebliche Daten für die Umstellung von Linie 934

In Abbildung 37 sind die Kosten für die Umstellung der Linien 934 dargestellt. Bei der Kostenberechnung wurde von einer 100 %igen Verfügbarkeit der eingesetzten Busse ausgegangen. Kosten für Reservevorhaltung sind daher nicht eingeschlossen und werden erst im Folgenden diskutiert.

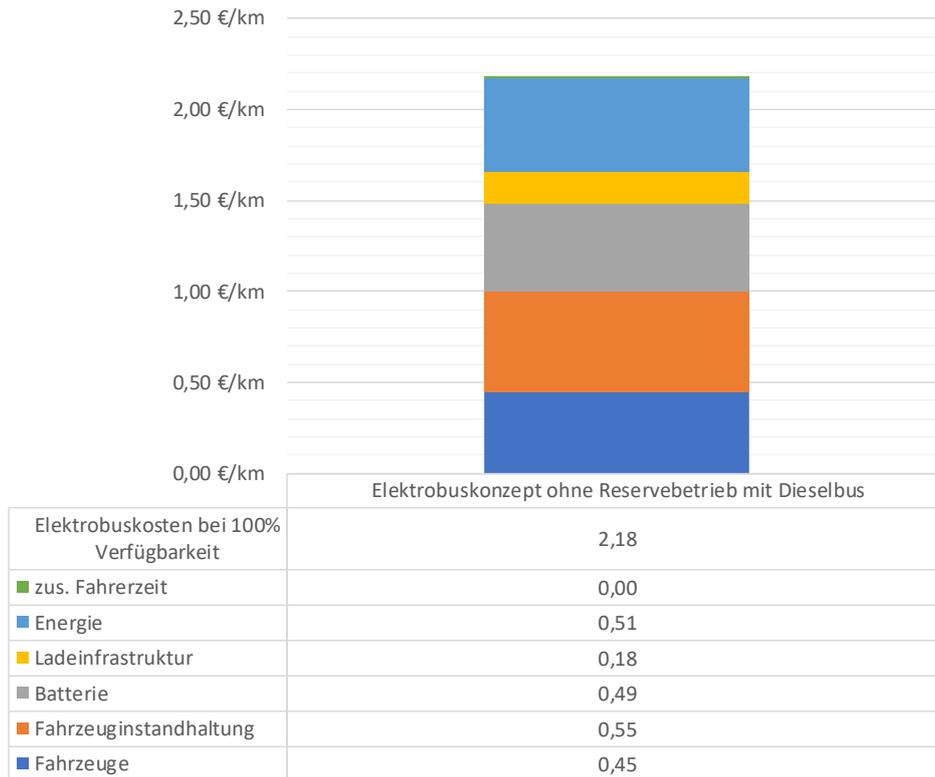


Abbildung 37: Linienübergreifende Kosten (Annuitäten pro Nutzkilometer) bei 100% Verfügbarkeit

### Reservevorhaltung aufgrund erhöhter Ausfallwahrscheinlichkeit

Bei Umsetzung der ersten Phase wird die Verfügbarkeit der Elektrobusse noch nicht auf dem Niveau der Dieselbusse liegen. Im Folgenden sind daher die erhöhte Reservevorhaltung und die damit verbundenen Kosten diskutiert. Annahme hierbei ist, dass die Verfügbarkeit um 15 % geringer ist als die der Dieselreferenz.

Die Umstellung der Linie 934 erfordert die Beschaffung von sieben Gelegenheitsladern vom Typ 1. Bei einer um 15 % reduzierten Verfügbarkeit wird ein zusätzlicher Dieselbus benötigt. Von der jährlichen Gesamtfahrleistung von ca. 543.000 Linienkilometern deckt das Reservefahrzeug dadurch ca. 84.000 Linienkilometer ab. Für die Reservehaltung des Fahrzeugs fallen Fixkosten von 0,06 €/km an, welche den Kosten für einen Dieselsolobus abzüglich des Restwerts, bezogen auf die Gesamt-Linienleistung von 543.000 Linienkilometern entsprechen. Weiterhin fallen zusätzliche operative Mehrkosten von 0,01 €/km durch den Reservebetrieb an. Diese Mehrkosten leiten sich wie folgt her: Die Bereitstellung der 84.000 Linienkilometern durch Dieselbusse führen zu Dieselbus-Betriebskosten, welche auf die Gesamtfahrleistung der Linie (543.000 Linienkilometer pro Jahr) bezogen 0,18 €/km betragen. Dafür fallen Elektrobus-Linienkilometer weg. Die Elektrobus-Betriebskosten, ebenso bezogen auf die jährliche Gesamtfahrleistung, ergeben sich zu 0,17 €/km. Abbildung 38 verdeutlicht diese Ermittlung der Betriebskosten-Differenz.

Die Reduzierung des Elektrobusbetriebs auf 85 % hat zur Folge, dass die Batterie der Elektrobusse weniger belastet wird und dadurch weniger altert. Jedoch wird auch hier im Sinne der konservativen Herangehensweise die Annahme getroffen, dass sich die Lebensdauer der Batterien nicht ändert.

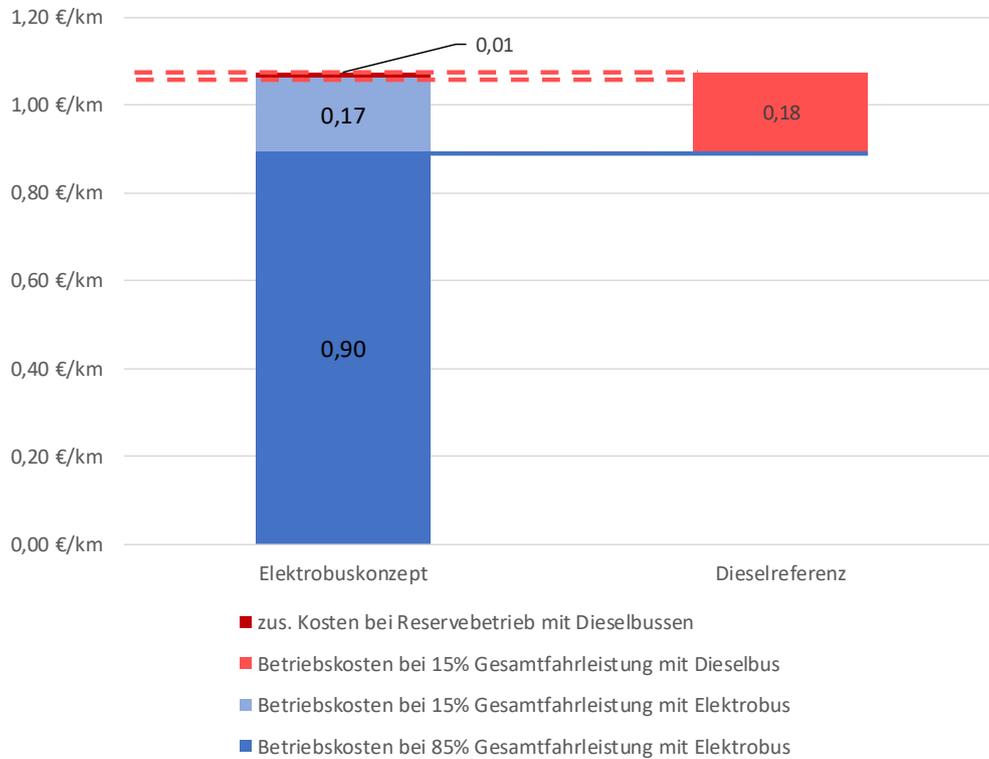


Abbildung 38: Linienübergreifende Betriebskosten der Linien 934 inklusive Reserve

Die Annuität je Kilometer für die Umsetzung der ersten Phase ist abschließend in Abbildung 39 aufgeführt. Durch die Reservevorhaltung und die höheren betrieblichen Kosten der Diesel-Reserve erhöhen sich die Annuitäten pro Nutzkilometer um 0,07 € (entspricht + 3 %).

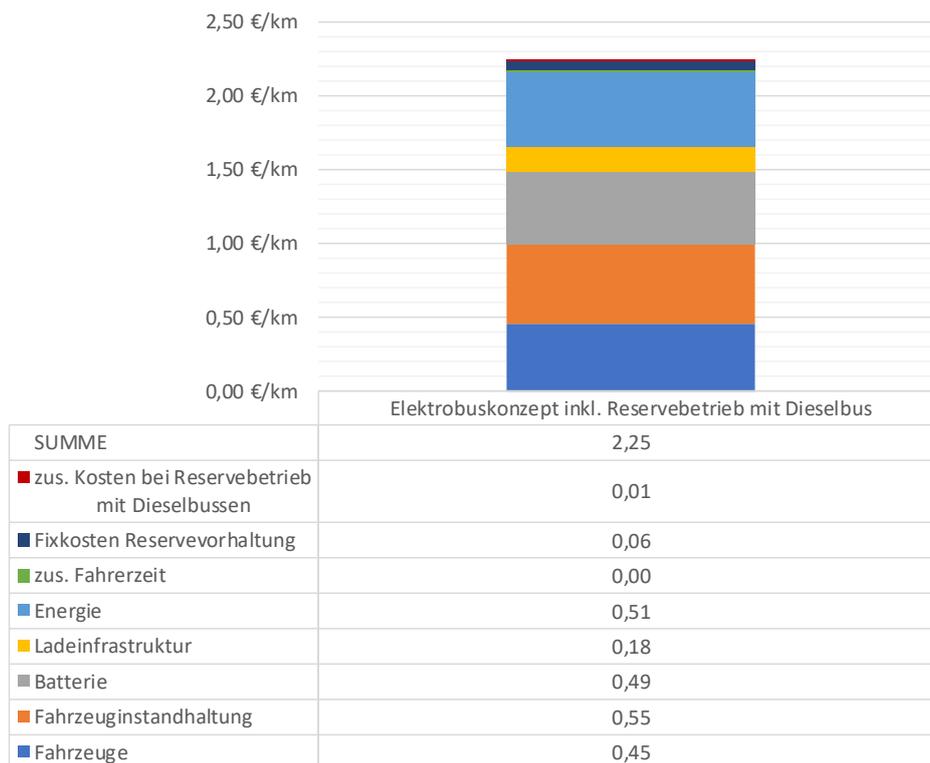


Abbildung 39: Linienübergreifende Kosten (Annuitäten pro Nutzkilometer) inklusive Reservevorhaltung

## 4.5 Weitere Umstellungsphasen

Die Elektrifizierung einer ganzen Flotte erfolgt sinnvollerweise in Einzelschritten. Die hierfür gewählten Abstände von zwei Jahren stellen Puffer bereit, um betriebliche Daten und Erfahrungen aus den zuvor elektrifizierten Linien zu sammeln und bei weiteren Umstellungen auf nachfolgende Linien zu projizieren. Mit der Definition der einzelnen Umstellungsphasen werden zugehörige Anfangsinvestitionen und Gesamtkosten für jede Phase vorgestellt. Die Kostenbetrachtung bezieht zudem die erwähnten Förderhöhen zwischen 40 bis 80 % mit ein. Dabei ist zu beachten, dass für alle förderfähigen Ausgaben die gleiche Förderquote angesetzt wird, also z.B. für die Ladeinfrastruktur keine andere Förderquote als für die Fahrzeuge angesetzt wird, wie es bestimmte Förderprogramme vorsehen. Abschließend werden ökologische Einflüsse der Elektrifizierung phasenweise analysiert.

Die Umstellungen im zweiten Zeitraum (ab 2026) sollten einer Neubewertung bezüglich des technischen Fortschritts und der getroffenen Annahmen unterzogen werden. Daher wird diese Phase innerhalb der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bewusst nicht näher analysiert, sondern nur hinsichtlich des Emissionseinsparungspotentials.

In Tabelle 21 sind alle Umstellungsphasen für das Netz der DVG zusammengefasst. Nachdem die Gelegenheitsladung in Phase A erprobt wird, bietet es sich an, ab 2022 in Phase B und C die Gelegenheitsladung weiter auszubauen. Es wird empfohlen in Phase B die Solobuslinien mit der Ref.-Nr. 905/906 (Linie Nord 1, Ringbuslinie), 924 (Linie 920) und 928 (Linie 928) sowie

Linie 909/910 (Linie Nord 3, Ringbuslinie) zu elektrifizieren. Dazu werden acht Ladesäulen mit einer Ladeleistung 300 kW an den Ladeorten Marxloh Pollmann (2x 905/906), Landschaftspark Nord (4x 909/910) und Winkelhausen Bruchstraße (1x 924, 1x 928) benötigt. Ladeleistungen dieser Größenordnung sind zum heutigen Zeitpunkt bereits Stand der Technik.

| Duisburger Busnetz laut neuem NVP (Stand Juli 2017) |               |                  |                    |  |                  |                    |  |                  |                    |   |
|---|---------------|------------------|--------------------|--|------------------|--------------------|--|------------------|--------------------|---|
| Phase   | Zeit-<br>raum | Dieselbusse      |                    | Elektrobusse - Depotladung   |                  |                    | Elektrobusse - Gelegenheitsladung                            |                  |                    |   |
|   |               | # Solo-<br>busse | # Gelenk-<br>busse | Linien   | # Solo-<br>busse | # Gelenk-<br>busse | Linien   | # Solo-<br>busse | # Gelenk-<br>busse | Orte für Schnellladung (Anzahl Stationen)   |
| Phase A   | 2020          | 0                | 6                  | -<br>-----<br>-  | -                | -                  | -<br>-----<br>934  | -                | 7                  | - Betriebshof Am Unkelstein (2x934)   |
| Phase B   | 2022          | 13               | 13                 | -<br>-----<br>-  | -                | -                  | 905/906,<br>924, 928<br>-----<br>909/910                     | 13               | 14                 | - Marxloh Pollmann (2x 905/906)<br>- Landschaftspark Nord (4x 909/910)<br>- Winkelhausen Bruchstraße (1x924, 1x928)               |
| Phase C   | 2024          | 16               | 13                 | -<br>-----<br>-  | -                | -                  | 40,<br>930/931,<br>933-1, 939,<br>942<br>-----<br>941, 933-2 | 16               | 13                 | - Duisburg Hbf Osteingang (1x40, 1x939)<br>- Schnabelhuck** (2x930/931)<br>- Uni Nord (2x933)<br>- Ehinger Berg (1x941***, 2x942) |
| Phase D   | 2026-<br>2031 | 22               | 35                 | 801*, 804*,<br>805*, 907,<br>922/923,<br>935, 940<br>-----<br>802*, 803*,<br>806*, 908,<br>916/917 | 27               | 16                 | -<br>-----<br>920, 921,<br>926                               | -                | 26                 | - Kaldenhausen Krölls (2x920)<br>- Duisburg HBF Osteingang (2x921)<br>- Uni Nord (2x926)  |

Tabelle 21: Umstellungskonzept

- \*: Nachtlinie
- \*\* : geeignete Endstelle der Ringlinie muss noch identifiziert werden
- \*\*\*: Ladeleistung höher als 300 kW erforderlich

In Phase C wird empfohlen, ab 2024 die Solobuslinien mit der Ref.-Nr. 40 (Linie SB 40), 930/931 (Linie Mitte 1), 939 (Linie 939), 942 (Linie Süd 2) sowie die Gelenkbuslinie 941 (Linie Süd 1) mit Gelegenheitsladung zu elektrifizieren. In diese Phase fallen also auch sämtliche Linien, die von den in Kapitel 1.7 beschriebenen Ergänzungen zum Nahverkehrsplan betroffen sind. Somit bleibt entsprechend Zeit, eine Neubewertung vorzunehmen, sobald die Ausgestaltung dieser Ergänzungen weiter konkretisiert wurde. Ebenfalls wird empfohlen, Linie 933, die sowohl Solo- als auch Gelenkbusse hat, in dieser Phase umzustellen. Für die Umsetzung werden vier Ladestationen mit 300 kW an den Ladeorten Duisburg Hbf Osteingang (1x 40, 1x 939) und Uni Nord (2x 933) installiert. Für die Ringlinie 930/931 (Linie Mitte 1) müsste eine geeignete Endstelle identifiziert werden, sodass zwei Ladestationen mit 300 kW dort errichtet werden können. Die derzeitige Endstelle Schnabelhuck ist für die Errichtung von Ladeinfrastruktur nicht geeignet. Es wird empfohlen für Linie 941 eine und für 942 zwei Ladestationen an der Endstelle Ehinger Berg zu errichten. Für die Ladestation der Linie 941 ist dabei eine Ladeleistung von etwas mehr als 300 kW erforderlich. Die Errichtung von Ladestationen an den Endstellen Uni Nord und Duisburg HBF Osteingang wurde bewusst in Phase C gelegt, da die Planungen für Phase D ebenfalls empfehlen, dort Ladeinfrastruktur zu erreichen. An dieser Stelle

ist anzumerken, dass ggf. noch Synergieeffekte genutzt werden können zwischen den Linien, die sich Endstellen teilen, so dass evtl. noch einzelne Ladestationen oder Fahrzeuge eingespart werden könnten. Weiterhin ist anzumerken, dass Die, die für die Auslegungen in dieser Studie nicht eingegangen sind,

Linien, welche dem zweiten Umsetzungszeitraum ab 2026 zugeordnet wurden, sind in der Übersicht als Phase D bezeichnet. Es ist sinnvoll, diese Linien ebenfalls in einem schrittweisen Prozess umzustellen, der auf Grundlage der technischen Weiterentwicklungen in 2024 oder 2025 neu bewertet und geplant werden sollte. Aus diesem Grund wird auf eine genaue Diskussion der Kosten für diesen Zeitraum im Rahmen des Umstellungskonzepts verzichtet. Die Investitionskosten für Phase D betragen nach derzeitigen Schätzungen rund 50 Mio. € für Elektrobusse gegenüber Investitionskosten in Höhe 18 Mio. € für Dieselbusse.

In Abbildung 40 sind die Investitionskosten für die Phasen A bis C im Duisburger Netz aufgelistet. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, belaufen sich die zusätzlichen Investitionskosten für Phase A auf rund 3 Mio. €. Durch eine 80 %-Förderung könnten diese auf etwa 900.000 € reduziert werden. Für Phase B ergeben sich zusätzliche Investitionen in Höhe von etwa 10 Mio. € bei einer Umstellung auf Elektrobusse. Insgesamt entsprechen die Investitionskosten für die Elektrobusse dem 2,2-fachen der Investitionskosten der Dieselbusreferenz. Durch eine 80 %-Förderung könnten die zusätzlichen Investitionen auf etwa 2,2 Mio. € reduziert werden. In Phase C stehen rund 18,6 Mio. € Investitionskosten für Elektrobusse Investitionskosten in Höhe von 8,7 Mio. € für Dieselbusse gegenüber.

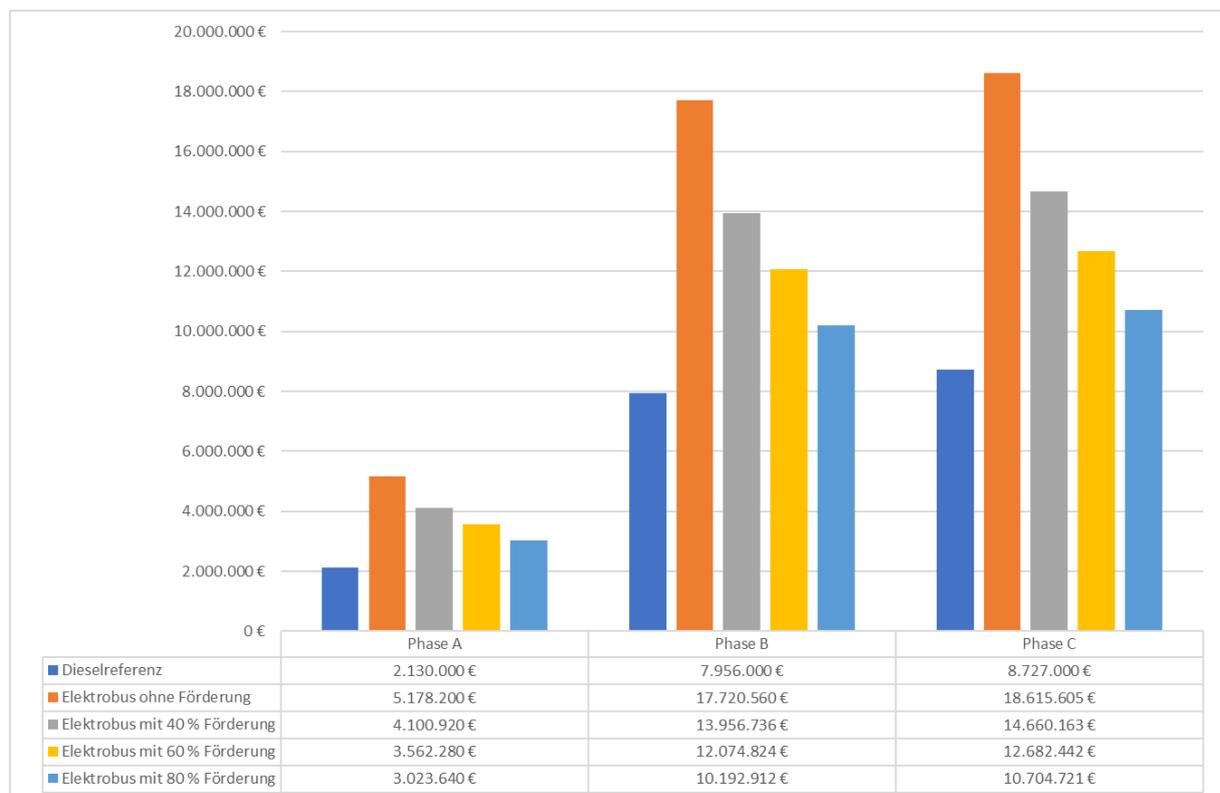


Abbildung 40: Phasenweise Übersicht der Investitionskosten inklusive Förderung

Die höheren Anfangsinvestitionen für die Elektrifizierung werden über den gesamten Betrachtungszeitraum allerdings durch die geringer anfallenden Energiekosten in Teilen kompensiert. Die entstehenden TCO (Annuitäten pro Nutzkilometer mit zusätzlichen Fahrerkosten) für die Phasen A bis C sind in Abbildung 41 dargestellt. Die Annuitäten der in Phase A betrachteten Linien belaufen sich im Dieselszenario auf rund 1,56 €/km. Ohne Förderung erreichen die Elektrobusse Annuitäten pro Nutzkilometer in Höhe von 2,18 €/km (ohne Reservebetrachtung). Selbst eine Förderung von 80 % ermöglicht keinen kostenneutralen Betrieb in Phase A. Für Phase B errechnen sich Annuitäten pro Nutzkilometer in Höhe von 1,45 €/km für den Dieselsbusbetrieb. Ein kostenneutraler Betrieb von Elektrobusen im Vergleich zur Dieselferenz ist auch bei einer Förderung von 80 % nicht erreichbar. In Phase C entstehen für die Dieselferenzbusse Annuitäten in Höhe von 1,56 €/km. Aufgrund der benötigten Mehrfahrzeuge wird auch hier eine kostenneutrale Umstellung auf Elektrobusse auch bei einer Förderung von rund 80 % nicht erreicht.

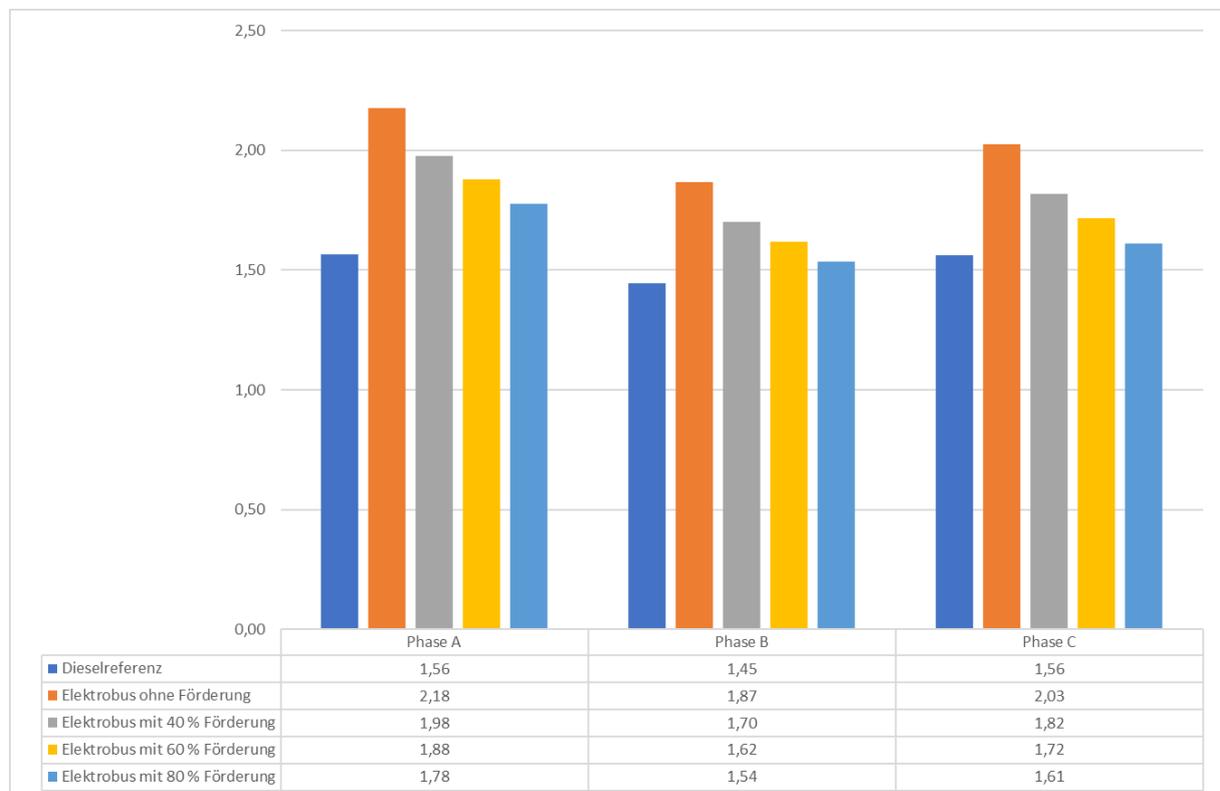


Abbildung 41: Kostenübersicht der Phasen inklusive Förderung (Annuitäten pro Nutzkilometer)

An dieser Stelle sei noch einmal erwähnt, dass die im Koalitionsvertrag zwischen CDU/CSU und SPD vom 07.02.2018 geplante Reduktion der EEG-Umlage von Strom für Elektrobusse auf das Niveau der EEG-Umlage von Strom für Schienenbahnen in dieser Studie noch nicht berücksichtigt wurde. Sie würde voraussichtlich zu einer Reduktion der Energiekosten um etwa 35 % führen. Für Umstellungsphase A (Linie 934) würde dies eine Reduktion der TCO um ca. 0,18 €/km ergeben.

Die phasenweise Elektrifizierung von Linien in Duisburg und damit auch die Reduzierung der Emissionen im Netz der DVG wird in den folgenden Diagrammen (Abbildung 42 bis Abbildung 44) deutlich. Durch die Umstellungen zwischen 2020 und 2025 werden jährlich ca. 45 % der CO<sub>2</sub>-, 46 % der NO<sub>x</sub>- und 28 % der PM-Emissionen eingespart. Von den verbliebenen Emissionen ab Phase C werden 423 t CO<sub>2</sub>, 137 kg NO<sub>x</sub> und 58 kg Feinstaub durch den fossilen Zuheizer erzeugt. Die Umstellung der restlichen Flotte (Phase D) würde noch einmal eine deutliche Reduktion der Emissionen bringen. An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass die Emissionen weiter reduziert werden könnten, indem anstelle des hier angesetzten Heizöls alternative Brennstoffe für den Zuheizer verwendet werden (beispielsweise Bio-Ethanol).

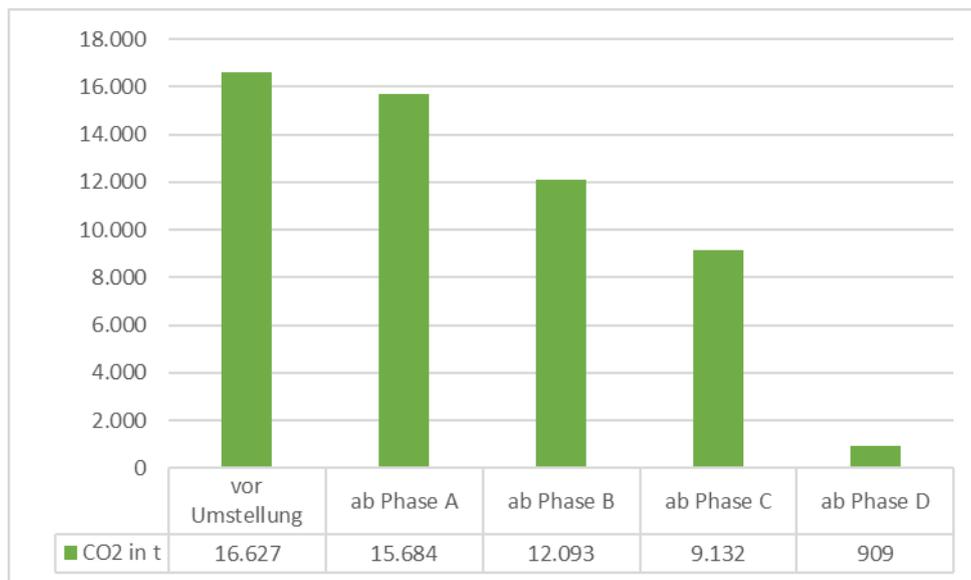


Abbildung 42: Jährliche Menge an CO<sub>2</sub>-Emissionen nach Phase

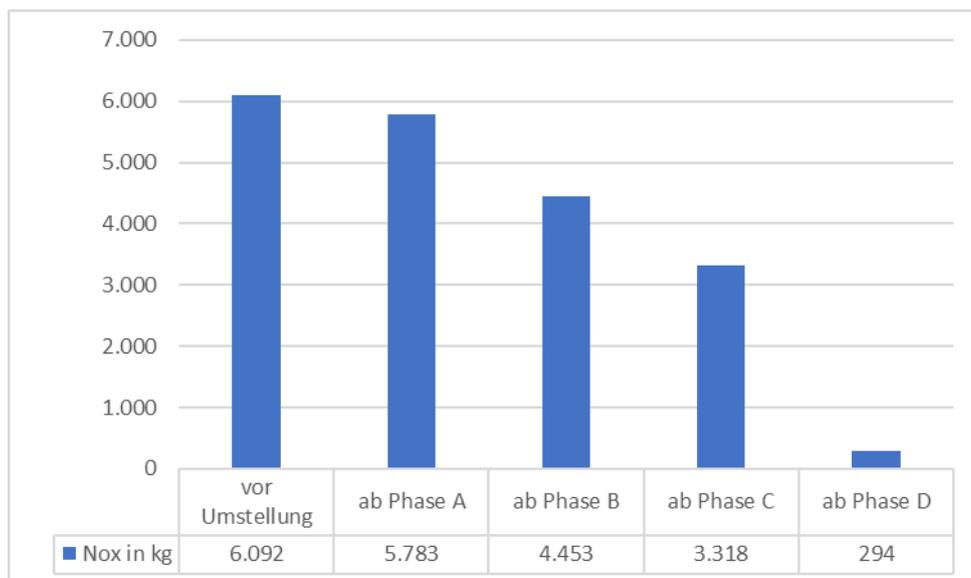


Abbildung 43: Jährliche Menge an NO<sub>x</sub>-Emissionen nach Phase

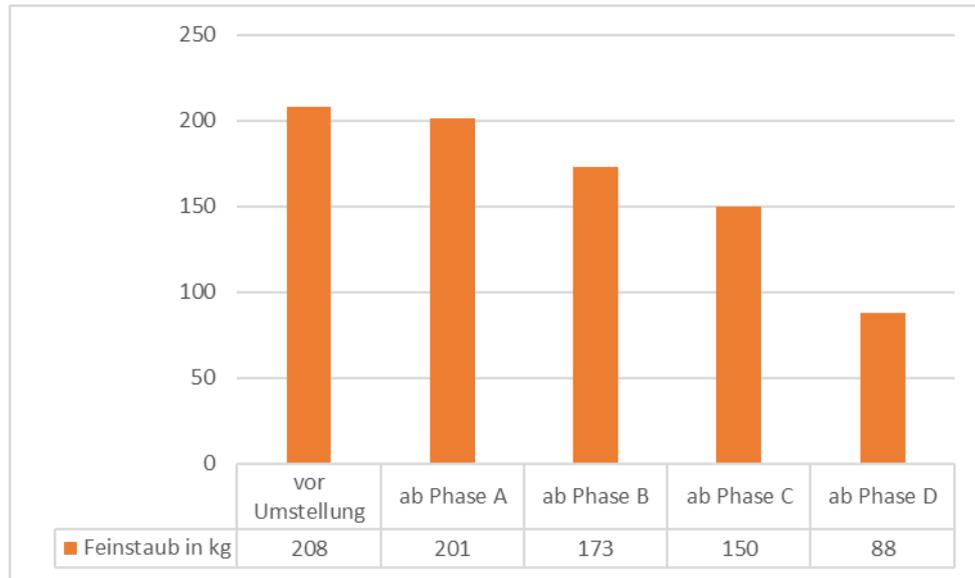


Abbildung 44: Jährliche Menge an PM-Emissionen nach Phase

## 5. Gesamtfazit und Diskussion

Für einen Teil der Linien laut derzeitigem Nahverkehrsplan im DVG Bedienungsgebiet ist eine Elektrifizierung bereits heute mit der derzeitig verfügbaren Technik mit geringem Fahrzeugmehrabbedarf möglich. Dabei ist ein Flottenmix aus Batteriebusen mit Depot- und Gelegenheitsladung empfehlenswert, um einen geeigneten Kompromiss aus betrieblicher Effizienz und ausreichender Einsatzflexibilität erreichen zu können.

Im direkten Vergleich zur Dieselmotortechnologie können große Mengen Emissionen eingespart werden, allerdings führt die Elektrifizierung unter den in der Studie konservativ getroffenen Annahmen zu deutlichen höheren Anfangsinvestitionen wegen der höheren Fahrzeugpreise und Infrastrukturkosten. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat gezeigt, dass die Mehrkosten nicht durch geringere operative Kosten kompensiert werden können. Eine Elektrifizierung resultiert daher ebenfalls in gesteigerten Total Cost of Ownership. Dabei unterscheiden sich die verschiedenen Elektrobusse zum Teil deutlich voneinander, was wiederum einen Flottenmix – aus begrenzt vielen verschiedenen Konzepten – empfehlenswert macht. Brennstoffzellenhybridbusse stellen sich wirtschaftlich deutlich nachteiliger dar als Batteriebusse.

Derzeitige Förderprogramme von Bund und Land NRW mit Zuschüssen in Bereich von 40 % bis zu 90 % bieten die Möglichkeit, die Mehrkosten einer Elektrifizierung zu reduzieren. Die langfristige Verfügbarkeit von Fördermitteln ist schwer abschätzbar.

Durch weitere externe Maßnahmen, wie z.B. die im aktuellen Koalitionsvertrag der designierten Regierungsparteien geplante Reduzierung der EEG-Umlage für Elektrobusse, könnte sich das Umfeld einer Elektrifizierung jedoch erheblich verbessern. Als weitere Chance, dass sich die Wirtschaftlichkeit von Elektrobussen gegenüber Dieselnissen besser darstellt, als in dieser Studie unter Verwendung konservativer Annahmen ermittelt, ist der Markteintritt von Europas größten Busherstellern, EvoBus und MAN, zu nennen. Der Anstieg des Angebots könnte mittelfristig auch bei den anderen Herstellern zu einer Korrektur der Verkaufspreise führen, die den Verkehrsbetrieben entgegenkommt. Weiterhin bieten Elektrobusse gegenüber Dieselnissen grundsätzlich das Potential niedrigerer Instandhaltungskosten.

## Referenzen

- [1] e-mobil BW, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, and Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg, *Wasserstoffinfrastruktur für eine nachhaltige Mobilität: Entwicklungsstand und Forschungsbedarf*, 2013.
- [2] Benjamin Reuter, Michael Faltenbacher, Oliver Schuller, Nicole Whitehouse, and Simon Whitehouse, *New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots: High-Level Techno-Economic Project Summary Report*, 2017.
- [3] Nitin Natesan, "Enabling Fuel Cell Bus Deployment: Technology from Linde," 2016.
- [4] Michael Faltenbacher, "NewBusFuel Results," London, Dec. 2016.
- [5] *GEOportal.NRW*. Available: <https://www.geoportal.nrw/>.
- [6] Benjamin Reuter, Michael Faltenbacher, Oliver Schuller, Nicole Whitehouse, and Simon Whitehouse, *New Bus ReFuelling for European Hydrogen Bus Depots: Guidance Document on Large Scale Hydrogen Bus Refuelling*, 2017.
- [7] Ralph Pütz, *Modell zur ökologischen und ökonomischen Analyse und strategischen Optimierung von Linienbusflotten*. Düsseldorf: Alba, op. 2010.
- [8] I. Shancita, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, I. M. Rizwanul Fattah, M. M. Rashed, and H. K. Rashedul, "A review on idling reduction strategies to improve fuel economy and reduce exhaust emissions of transport vehicles," *Energy Conversion and Management*, vol. 88, pp. 794–807, 2014.

## Anhang 1 – Endstellenauswertung

| Name                           | Auftreten Dienstag | Generelle Eignung | Stellplatz für Überlage | Zugang Bahn DC-Netz                 | Feedback DVG   |
|--------------------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------------------|--|
| <b>Anne Frank Realschule</b>   | 38                 | nicht geeignet    | nicht geeignet          | nein, keine Straßenbahn in der Nähe | Ausschluss   |
| <b>Sterkrade Bf</b>            | 63                 | nicht geeignet    | nicht geeignet          | ja, Straßenbahn-Haltestelle         | Ausschluss   |
| <b>OB-Holten Bf</b>            | 37                 | nicht geeignet    | nicht geeignet          | nein, keine Straßenbahn in der Nähe | Ausschluss   |
| <b>Marxloh Pollmann</b>        | 80                 | geeignet          | vorhanden               | nein, keine Straßenbahn in der Nähe | Wäre geeignet, Aufstellfläche für 2. Bus vorhanden         |
| <b>Duisburg Hbf</b>            | 58                 | nicht geeignet    | nicht geeignet          | ja, Straßenbahn-Haltestelle         | Ausschluss   |
| <b>Birkenstraße</b>            | 35                 | nicht geeignet    | nicht geeignet          | nein, keine Straßenbahn in der Nähe | Nicht geeignet   |
| <b>Symphersstraße</b>          | 37                 | nicht geeignet    | nicht geeignet          | nein, keine Straßenbahn in der Nähe | Nicht geeignet   |
| <b>Schnabelhuck</b>            | 72                 | nicht geeignet    | nicht geeignet          | nein, keine Straßenbahn in der Nähe | Nicht geeignet   |
| <b>St.-Anna-Krankenhaus</b>    | 42                 | nicht geeignet    | nicht geeignet          | ja, U-Bahn                          | Nicht geeignet   |
| <b>Duisburg Hbf Osteingang</b> | 176                | geeignet          | bedingt geeignet        | nein, keine Straßenbahn in der Nähe | Nur mit umfangreichen Umbaumaßnahmen möglich               |
| <b>Oberhauser Str</b>          | 40                 | nicht geeignet    | nicht geeignet          | nein, keine Straßenbahn in der Nähe | Nicht geeignet   |
| <b>St.-Johannes-Hospital</b>   | 79                 | nicht geeignet    | nicht geeignet          | nein, keine Straßenbahn in der Nähe | Nicht geeignet   |
| <b>Buschhauser Str</b>         | 40                 | geeignet          | vorhanden               | nein, keine Straßenbahn in der Nähe | Wäre bedingt geeignet; Aufstellfläche für 2. Bus vorhanden |
| <b>Kaldenhausen Krölls</b>     | 112                | geeignet          | vorhanden               | nein, keine Straßenbahn in der Nähe | Nur mit umfangreichen Umbaumaßnahmen möglich               |
| <b>Ehinger Berg</b>            | 99                 | geeignet          | bedingt geeignet        | nein, keine Straßenbahn in der Nähe | Busbuchten nicht verlängerbar LKW Verkehr                  |
| <b>Rheindeich</b>              | 73                 | geeignet          | vorhanden               | nein, keine Straßenbahn in der Nähe | Nur mit umfangreichen Umbaumaßnahmen möglich               |

|                                  |     |                |                  |  |  |
|----------------------------------|-----|----------------|------------------|--|--|
| <b>Sportpark</b>                 | 42  | geeignet       | vorhanden        | nein, keine Straßenbahn in der Nähe    | Wäre bedingt geeignet; Aufstellfläche für 2. Bus vorhanden/ DB Gelände         |
| <b>Großenbaum Bf Ost</b>         | 47  | nicht geeignet | nicht geeignet   | nein, keine Straßenbahn in der Nähe    | Nicht geeignet   |
| <b>Bissingheim Dorfplatz</b>     | 53  | nicht geeignet | nicht geeignet   | nein, keine Straßenbahn in der Nähe    | Nicht geeignet   |
| <b>Rahm Bf</b>                   | 46  | nicht geeignet | nicht geeignet   | nein, keine Straßenbahn in der Nähe    | Nicht geeignet   |
| <b>Hochheide Markt</b>           | 80  | nicht geeignet | nicht geeignet   | nein, keine Straßenbahn in der Nähe    | Nicht geeignet   |
| <b>Godesberger Str</b>           | 77  | nicht geeignet | nicht geeignet   | nein, keine Straßenbahn in der Nähe    | Nicht geeignet   |
| <b>Betriebshof Am Unkelstein</b> | 253 | geeignet       | vorhanden        | nein, U-Bahn im Osten zu weit entfernt | Ladestation evtl. auf dem Parkplatz Betr. Unkelstein                           |
| <b>Wolfssee</b>                  | 89  | geeignet       | vorhanden        | nein, keine Straßenbahn in der Nähe    | Wäre geeignet Aufstellfläche für 2. Bus vorhanden                              |
| <b>Landschaftspark Nord</b>      | 222 | geeignet       | bedingt geeignet | ja, Straßenbahn-Haltestelle            | Unterwerk zw. Amsterdamerstr. und Th.-Heuß-Str. --- Ansonsten bedingt geeignet |
| <b>Uni Nord</b>                  | 160 | geeignet       | vorhanden        | nein, keine Straßenbahn in der Nähe    | Parkplatz an der Endstelle nicht nutzbar, da UNI Parkplatz                     |
| <b>Baerl Kirche</b>              | 43  | nicht geeignet | nicht geeignet   | nein, keine Straßenbahn in der Nähe    | Nicht geeignet   |
| <b>Winkelhausen Bruchstraße</b>  | 54  | geeignet       | vorhanden        | nein, keine Straßenbahn in der Nähe    | Wäre bedingt geeignet Aufstellfläche für 2. Bus vorhanden                      |
| <b>Friemersheim Markt</b>        | 76  | nicht geeignet | nicht geeignet   | nein, keine Straßenbahn in der Nähe    | Nicht geeignet   |
| <b>Moers-Königlicher Hof</b>     | 69  | nicht geeignet | nicht geeignet   | nein, keine Straßenbahn in der Nähe    | Ausschluss   |

Tabelle 22: Ergebnisse Endstellenbewertung<sup>10</sup>

<sup>10</sup> "Generelle Eignung" bezieht u.a. ein: Platz für Errichtung von Ladestationen; stehender Bus (ca. 10 min) stört nicht Rest des Verkehrs; etc.