

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Machbarkeitsstudie zur Umstellung des Busbetriebs

Ergebnisbericht, Juni 2024

Auftraggeber
Stadtwerke Remscheid GmbH
Neuenkamper Str. 81-87
42855 Remscheid
www.stadtwerke-remscheid.de

Auftragnehmer
**VCDB VerkehrsConsult
Dresden-Berlin GmbH**
Könneritzstraße 31
01067 Dresden
Tel. 0351 4823 100
Fax 0351 4823 109
dresden@vcdb.de
www.vcdb.de

Standorte
Dresden
Berlin
Magdeburg
Leipzig

Ansprechpartner
Christine Schwärzel-Lange
c.schwaerzel-lange@vcdb.de

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	8
1.1	Ausgangslage	8
1.2	Zielsetzung.....	8
1.3	Angaben zum Fuhrpark, Infrastruktur und Betrieb der SR.....	9
1.4	Engagement der SR.....	9
1.5	Inhaltliche Schwerpunkte der Machbarkeitsstudie.....	10
2	Grundlagentechnologiebetrachtung des Batteriebusystems ..	11
2.1	Fahrzeugkonzept	11
2.1.1	Depotlader/Volllader	11
2.1.2	Gelegenheitslader.....	13
2.2	Antriebssystem	14
2.2.1	Zentralmotoren.....	14
2.2.2	Radnaher Antrieb.....	15
2.2.3	Radnabenantrieb	15
2.3	Energiespeicher	16
2.3.1	Batteriespeicher	16
2.4	Heizungs- und Klimatisierungskonzept	17
2.4.1	Energiebedarf	17
2.4.2	Heizanlage	19
2.4.3	Klimatisierung	21
2.5	Elektrische Energiebereitstellung	21
2.6	Energiezuführung	22
2.7	Technologievergleich BEB/DL und BEB/GL	23
3	Fuhrpark- und Betriebshofanalysen	25
3.1	Fuhrparkanalyse	25
3.2	Ladeinfrastrukturanforderungen	26
3.3	Anforderung an die Abstellung	26

3.4	Anforderung des Brandschutzes	27
3.5	Werkstattanforderungen	28
3.6	Bewertung	29
4	Strecken- und Einsatzanalysen	31
4.1	Betriebliche Bewertung des Depotladers	31
4.2	Betriebliche Bewertung des Gelegenheitsladers	31
5	Infrastrukturanforderungen und -bedarfe	32
5.1	Konzeption der Ladeinfrastruktur Strecke	32
5.2	Konzeption der Ladeinfrastruktur Betriebshof	32
6	Analysen zur Energiebereitstellung	34
6.1	Untersuchung Netzanbindung	34
6.2	Konzeption elektrische Grundversorgung Betriebshof	34
6.3	Nutzung erneuerbarer Energien	35
6.3.1	Blockheizkraftwerk	35
6.3.2	Photovoltaik	36
6.3.3	Windenergie	36
7	Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten	38
7.1	Potential von Last- und Lademanagement	38
7.2	Weitere Maßnahmen zur Effizienzsteigerung	39
8	Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe	41
8.1	Investitionskosten und Gesamtkosten	41
8.1.1	Datengrundlage	41
8.1.2	Ermittelte Investitionskosten	44
8.1.3	Ermittelte Gesamtkosten	46
8.2	Umweltparameter und Umweltkosten	47
8.2.1	Grundlage	47
8.2.2	Ermittelte Emissionen von CO ₂ -Äquivalenten	48
8.2.3	Lokale Schadstoffemissionen	49
9	Zusammenfassung und Ausblick	51

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Inhaltsverzeichnis

9.1	Gegenüberstellung BEB/DL und BEB/GL.....	51
9.2	Die fünf Projektstufen.....	51

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prinzip Batteriebus.....	11
Abbildung 2:	Antriebsstrang Zentralmotor	14
Abbildung 3:	Antriebsstrang radnaher Motor	15
Abbildung 4:	Antriebsstrang Radnabenmotor	15
Abbildung 5:	Heizenergiebedarf eines Solobusses.....	18
Abbildung 6:	Energiebilanz Dieselbus	18
Abbildung 7:	Energiebilanz Batteriebus	19
Abbildung 8:	Die fünf Projektstufen.....	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Vergleich gravimetrischer Energiedichten	16
Tabelle 2:	Fahrzeugenergiebedarf Dieselbus und Batteriebus.....	19
Tabelle 3:	Technologievergleich BEB/DL und BEB/GL	24
Tabelle 4:	Beschaffungsstufen Fahrzeuge	25
Tabelle 5:	Investitionskosten Flotte BEB DL	45
Tabelle 6:	Investitionskosten Flotte BEB GL	45
Tabelle 7:	Gesamtkosten Flotte Dieselbus, BEB DL, BEB GL, ohne Förderung	46
Tabelle 8:	Gesamtkosten Flotte Dieselbus, BEB DL, BEB GL, mit Förderung	46
Tabelle 9:	Energieverbrauch und Bilanz der CO ₂ -Äquivalente, Flotte Dieselbus, BEB DL, Well-to-Wheel-Betrachtung, ein Jahr	48
Tabelle 10:	Energieverbrauch und Bilanz der CO ₂ -Äquivalente, Flotte Dieselbus, BEB GL, Well-to-Wheel-Betrachtung, ein Jahr	49
Tabelle 11:	Einsparpotential lokaler Schadstoffemissionen, Flotte Dieselbus ggü. Batteriebus, Well-to-Wheel-Betrachtung, ein Jahr	50

Abkürzungsverzeichnis

AC	...	Wechselspannung (engl. Alternating Current)
BEB	...	Batterieelektrischer Bus
BHKW	...	Blockheizkraftwerk
BMDV	...	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
CO	...	Kohlenstoffmonoxid
DC	...	Gleichspannung (engl. Direct Current)
DL	...	Depotlader
EWR	...	Energie und Wasser für Remscheid
GL	...	Gelegenheitslader
HC	...	Kohlenwasserstoffe
HV	...	Hochvolt
LIS	...	Ladeinfrastruktur
LMS	...	Last- und Lademanagementsystem
NO _x	...	Stickoxide
NRW	...	Nordrhein-Westfalen
OCCP	...	Open Chargepoint Protokoll
PM	...	Feinstaub (engl. Particulate Matter)
PV	...	Photovoltaik
SOC	...	Ladezustand (engl. State of charge)
SR	...	Stadtwerke Remscheid
VDS	...	VdS Schadenverhütung GmbH
VDV	...	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Stadtwerke Remscheid verfolgen die Möglichkeiten des Einsatzes von alternativen Antriebstechnologien bereits seit vielen Jahren mit großem Interesse. Die Entwicklung einer Umsetzungsstrategie hin zu einem rein emissionsfreien Verkehrsbetrieb erfolgt durch die Stadtwerke Remscheid stets in enger Abstimmung mit der Stadt Remscheid und im Einklang mit deren Mobilitäts- und Nachhaltigkeitsstrategie.

Vor dem Hintergrund der Erfüllung der Clean-Vehicles-Directive-Vorgaben und dem Streben nach Verbesserung der Luftqualität und Minderung von Lärmemissionen wurden im Rahmen einer Voruntersuchung alle marktverfügbaren Elektrobuskonzepte hinsichtlich des Einsatzes im Verkehrsbetrieb der Stadtwerke Remscheid GmbH, im Weiteren SR genannt, bewertet. Im Ergebnis des Technologievergleichs wurde der batterieelektrische Bus als das für Remscheid geeignete System spezifiziert. Durch die Stadtwerke Remscheid wurde die Entscheidung getroffen, mit der Umstellung ihrer Busflotte auf Batteriebusbetrieb zu beginnen. Demnach sind im nächsten Schritt alle notwendigen Untersuchungen zur Festlegung des geeigneten Fahrzeug- und Ladekonzepts, wobei zwischen Depotlader- und Gelegenheitsladereinsatz zu unterscheiden sein wird, durchzuführen.

Die Beschaffungsstrategie sieht eine Umstellung der Gesamtflotte von insgesamt 86 Fahrzeugen auf batterieelektrischen Busbetrieb bis zum Jahr 2037 vor.

1.2 Zielsetzung

Gegenstand der Machbarkeitsstudie ist das Aufzeigen der technischen, betrieblichen, wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen bei Umstellung des konventionellen Busbetriebs auf Batteriebusbetrieb. Im Ergebnis soll eine Entscheidung über den zukünftigen Einsatz von Depotladern oder Gelegenheitsladern getroffen werden und deren Anforderungen an den Einsatz im Verkehrsbetrieb Remscheid aufgezeigt werden.

Primäre Zielgruppe des Projektes und der Projektergebnisse ist die Stadtwerke Remscheid, vertreten zum einen durch die Geschäftsleitung, die für die Umsetzung strategischer Projekte und Maßnahmen verantwortlich ist. Zum anderen sind die Projektergebnisse aber auch für weitere Fach- und Führungskräfte von Bedeutung, etwa aus den Bereichen Fahr- und Dienstplanung, Einsatzplanung, Personaldisposition oder Werkstatt. Zudem sind die

Erkenntnisse für die politischen Entscheidungsträger in der Stadt Remscheid, Land und Bund relevant.

1.3 Angaben zum Fuhrpark, Infrastruktur und Betrieb der SR

Die Busflotte der SR umfasst aktuell 86 Stadtlinienbusse, anteilig 63 Solobusse und 23 Gelenkbusse. Die Busse sind in der Regel 16 Jahre im Linieneinsatz und werden im Rahmen von jährlichen Ausschreibungen durch Neufahrzeuge ersetzt. Das Durchschnittsalter der Flotte beträgt 9 Jahre. Der gesamte Fuhrpark wird durch umweltfreundlich ausgestattete EEV- oder Euro-VI-Fahrzeuge abgebildet. Zudem werden seit 2018 bereits 32 Mild-Hybridbusse eingesetzt. Ab dem Jahr 2024 wird der Fuhrpark auf Elektrobusbetrieb umgestellt.

Der zentrale Omnibusbahnhof (ZOB) befindet sich am Friedrich-Ebert-Platz. Seit 2022 bis vsl. 2025 wird der ZOB mit Einsatz von Fördergeldern des VRR (ÖPNV-Förderung und Städtebauförderung) umgestaltet. Die betrieblichen Anforderungen des Buslinienverkehrs finden hierbei Berücksichtigung. Der ZOB bindet alle Stadtlinien an; zudem ist er Ausgangspunkt für die Nachtlinien. Am ZOB befindet sich die Leitstelle der SR.

Der Betriebshof Neuenkamper Straße zeichnet sich durch eine zentrale Lage aus. Hier befinden sich die Abstellhalle, die Betriebshofwerkstatt sowie das Verwaltungsgebäude der Stadtwerke Remscheid. Die Abstellung der Fahrzeuge erfolgt ausschließlich in der geschlossenen Abstellhalle. Das Instandhalten der Fahrzeuge erfolgt durch die SR vollständig in Eigenregie in der Werkstatt auf dem Betriebshof.

Derzeit sind weder der Betriebshof noch die Endpunkte mit für den Elektrobusbetrieb notwendiger Ladeinfrastruktur ausgerüstet. Der Netzanschluss im Betriebshof ist derzeit ausschließlich für die Versorgung des Bestandsbetriebshofs ausgelegt.

Die SR verwendet zur Planung, Steuerung und Überwachung des Betriebs verschiedene Systeme. Zur rechnergestützten Betriebsüberwachung und -steuerung verwendet die SR das Transport Control System der Firma ATRON electronic GmbH. Die Erstellung der Fahr-, Umlauf- und Dienstpläne erfolgt mit dem Programm EPON der Firma ISIDATA Gesellschaft für elektronische Datenverarbeitung mbH. Für das digitale Werkstatt-Management ist eine SAP-Software im Einsatz und für die Tankdatenerfassung wird die Software der Firma Autopoll Service GmbH eingesetzt. Zur Planung, Steuerung und Kontrolle der Betriebsabläufe im Betriebshof wird ein separat anzuschaffendes Betriebshofmanagementsystem benötigt.

1.4 Engagement der SR

Erste Erfahrungen konnte die SR bereits durch den Einsatz von Batteriebussen verschiedener Anbieter, in den Jahren 2021 und 2022, sammeln. Die Busse wurden im Remscheider Stadtgebiet vornehmlich auf den Linien 664, 669 und 240 eingesetzt. Für den Zeitraum des

Testbetriebs wurden eine Pantographen-Schnellladestation am Endpunkt Lennep Bahnhof sowie ein Ladegerät im Betriebshof installiert und als Ladepunkte während des Betriebseinsatzes genutzt. Aus dem Testbetrieb konnten Erkenntnisse hinsichtlich Reichweite, Zuverlässigkeit und Akzeptanzverhalten generiert werden.

Mit Erstellung dieser Machbarkeitsstudie dokumentieren die Stadtwerke Remscheid die im Unternehmen gepflegte Kontinuität beim Engagement für moderne und nachhaltige Antriebskonzepte.

Die SR ist sehr engagiert in den Bereichen Nachhaltigkeit und Klimaschutz. Es gibt eine klare Strategie für die Zukunft, in der neben der Fortentwicklung der verkehrlichen Qualität der Einsatz innovativer und umweltfreundlicher Antriebstechnologien ein Hauptbestandteil ist.

Teil des unternehmerischen Engagements ist es, dessen Inhalte und Hintergründe transparent gegenüber den eigenen Mitarbeitern, der Bevölkerung und der lokalen Politik zu kommunizieren.

1.5 Inhaltliche Schwerpunkte der Machbarkeitsstudie

Die inhaltliche Bearbeitung greift folgende Bearbeitungsschwerpunkte auf:

- Grundlagentechnologiebetrachtung des Batteriebusystems,
- Fuhrpark- und Betriebshofanalysen,
- Strecken- und Einsatzanalysen,
- Infrastrukturanforderungen und -bedarfe,
- Analysen zur Energiebereitstellung,
- Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten sowie
- betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe.

2 Grundlagentechnologiebetrachtung des Batteriebusystems

Eine grundlegende Technologiebetrachtung zum Batteriebusseinsatz soll der Untersuchung vorangestellt werden. Diese soll einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik geben.

2.1 Fahrzeugkonzept

Batteriebusse (BEB) verfügen über eine Traktionsbatterie (vgl. Abbildung 1), welche stationär für den Betriebseinsatz mit elektrischer Energie geladen wird (Plug-In-System und/oder Pantograph) sowie einen oder mehrere Elektromotoren (E) zur Bewältigung der eigentlichen Traktionsaufgabe. Die Einsatzfähigkeit dieser Fahrzeuge richtet sich nach dem Energieinhalt des Batteriespeichers sowie der zulässigen Lade- und Endladeleistung und damit der resultierenden maximalen Ladegeschwindigkeit.

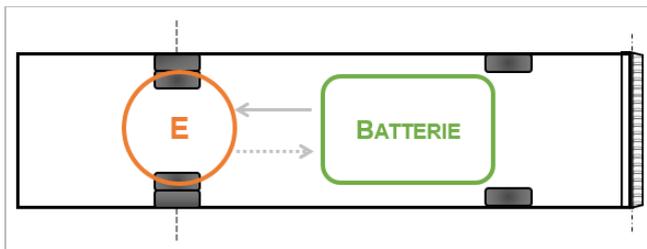


Abbildung 1: Prinzip Batteriebus

Batteriebusse werden nach ihrer Ladestrategie in Depot- und Gelegenheitslader unterteilt. Die Wahl der jeweiligen Ladestrategie wird im Wesentlichen von folgenden Aspekten bestimmt:

- Heizkonzept (rein elektrisch oder hybrid)
- Klimatisierungskonzept (Fahrerklimatisierung, ΔT -Klimatisierung, Vollklimatisierung),
- Umlaufpläne und Gesamtfahrweiten
- der Möglichkeit von Fahrpausen für das Wiederaufladen der Batterien
- der Möglichkeit zum Errichten/Betreiben von Ladeinfrastruktur außerhalb des Betriebshofs

2.1.1 Depotlader/Volllader

Das Depotlader-Prinzip beruht auf der ausschließlichen Nachladung der Batterien auf Betriebshöfen oder Abstellanlagen, während dafür vorgesehener Aufenthaltszeiten.

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Grundlagentechnologiebetrachtung des Batteriebusystems

Ist die Kapazität des Energiespeichers im Fahrzeug für einen ganzen Tageseinsatz ausgelegt, so handelt es sich um einen Depotlader. Die Nachladung der im Vergleich zum Gelegenheitslader größeren Energiespeicher erfolgt an zentralen Punkten während der Betriebspause, vorzugsweise im Betriebshof. Bei zeitgleicher Ladung von mehreren Bussen an einem Ort ist eine entsprechende Anzahl von Ladepunkten vorzusehen. Die Auslegung der Ladepunkte ist abhängig von der Kapazität und der maximalen Ladeleistung der Batterie und des für die Ladung zur Verfügung stehenden Zeitfensters. Diese Parameter bestimmen das Betriebskonzept.

Der Depotlader lädt hauptsächlich über Nacht im Betriebshof und kann somit über eine längere Zeitspanne mit einer geringen Ladeleistung geladen werden. Eine Ladung mit geringerer Ladeleistung, und damit auch geringerem Strom, kann zu einer höheren Lebenserwartung/Einsatzdauer des Speichers führen. Es ist möglich, auch beim Depotlader eine Zwischenladung während des Einsatztages zu realisieren, um die Tagesfahrleistung zu optimieren oder die Netzlast während der Nachtladung zu reduzieren. Eine solche Zwischenladung mit, im Vergleich zur Gelegenheitsladung, geringerer Ladeleistung kann beispielsweise bei längeren Betriebspausen im Betriebshof erfolgen. Auch ein Fahrzeugtausch ist für ein solches Szenario denkbar.

Der beim Depotlader erforderliche große Energieinhalt des Speichers geht einher mit einem hohen Eigengewicht und einem entsprechenden Platzbedarf. In der Folge liegt das Fahrzeugleergewicht tendenziell oberhalb dem eines Gelegenheitsladers. Bei den meisten Herstellern befinden sich die Traktionsbatterien auf dem Dach des Fahrzeugs bzw. im vormaligen Motorturm. Teilweise gehen die Hersteller dazu über, Batteriepakete im Fahrzeugunterboden zu platzieren. Der niedrigere Schwerpunkt hat insbesondere fahrdynamische Vorteile.

Die Verfügbarkeit von Batteriebussen liegt aktuell bei maximal 90 % bis 92 %. Somit sind mindestens acht bis zehn Prozent der Flottengröße als Werkstattreserve vorzusehen. Aufgrund der neuartigen Technologie sind eher 12 % bis 13 % empfehlenswert. Bezüglich der Wartung und Instandhaltung liegen noch keine ausreichenden Informationen zur Bewertung vor. Der Wartungs- und Instandhaltungsaufwand kann bei Batteriebussen im Vergleich zu Dieselnissen als ähnlich eingeschätzt werden. Zwar ist der Elektroantrieb mechanisch einfacher aufgebaut als eine Verbrennungskraftmaschine und kann im generatorischen Betrieb rekuperierend und verschleißfrei bremsen, dafür ergeben sich neue Wartungs- und Instandhaltungsumfänge. So weisen beispielsweise die komplex aufgebauten Elektroportalachsen geringere Standzeiten, also kürzere Wartungs- und Instandhaltungsintervalle, als konventionelle Antriebsstränge auf. Auch der Reifenverschleiß ist aufgrund der hohen möglichen Anfahrmomente der Traktionsmotoren und des höheren Fahrzeugleergewichtes tendenziell höher.

Bei entsprechender Dimensionierung der Fahrzeugbatterie kann ein Depotlader viele der derzeit üblichen Betriebsszenarien von Dieselnissen gleichwertig abbilden. Abhängig vom

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Grundlagentechnologiebetrachtung des Batteriebusystems

Fahrprofil und der Fahrzeugkonfiguration können mit einer Ladung Reichweiten von ca. 150 km bis 300 km unter allen Einsatzbedingungen erreicht werden. Sie bieten im Vergleich zu Gelegenheitsladern – welche stets eine betriebliche Abhängigkeit von ihrer Zwischenlademöglichkeit haben – eine größere Einsatzflexibilität, lediglich begrenzt durch die Reichweite des Busses. Sie müssen im Vergleich zu Gelegenheitsladern auf einem Betriebs- hof oder einer Abstellanlage deutlich mehr Energie nachladen. Das kann wiederum zu einer leistungsstärkeren und damit teureren Ladeinfrastruktur sowie zu höheren Anschlussleistungen und damit verbundenen Mehrkosten führen.

2.1.2 Gelegenheitslader

Gelegenheitslader werden in der Regel bei planmäßig längeren Aufenthaltszeiten auf dem Betriebshof sowie an Ladestationen außerhalb des Betriebshofes geladen. Die Ladestrategie sieht entsprechend der Streckencharakteristik neben einer Nachladung auf dem Betriebshof weitere Ladepunkte an Wendepunkten vor.

Der Gelegenheitslader verfügt häufig über einen Energiespeicher mit geringerem Energieinhalt (vgl. Depotlader), welcher nicht für einen kompletten Tageinsatz ausgelegt ist. Der Energiespeicher muss während des Linieneinsatzes auf der Strecke nachgeladen werden. Im Gegensatz zum Depotlader mit Zwischenladung kommen beim Gelegenheitslader hohe Ladeleistungen und oft auch ein eigens hierfür vorgesehenes Ladesystem (z. B. Docking-Station) zur Anwendung.

Der Batteriebus fährt einen Ladepunkt, der an einer Haltestelle eingerichtet ist, an. Sobald das Fahrzeug am Ladesystem positioniert ist, wird automatisch oder durch eine Aktion des Fahrpersonals die Kontaktherstellung ausgelöst und anschließend die Energieübertragung mit Leistungen bis derzeit etwa 450 kW gestartet. Generell beanspruchen hohe Ladeleistungen herkömmliche Akkumulatoren stärker, d. h. sie führen zu einer verstärkten Zellalterung und wirken sich somit negativ auf die Lebensdauer des Energiespeichers aus.

Im Vergleich zum Depotlader-Konzept, kann durch das Zwischenladen während des Betriebseinsatzes der Energiespeicher kleiner ausgelegt werden. Dies wirkt sich in mehreren Aspekten positiv auf das Gesamtfahrzeug aus: Kleinere Energiespeicher haben ein geringeres Gewicht und nehmen weniger Bauraum in Anspruch.

Gelegenheitslader bieten demnach ein höheres Platz- und Gewichtspotenzial für die Personenbeförderung sowie für den Verbau weiterer Aggregate. Der freiwerdende Bauraum wird dabei für – bei der Gelegenheitsladung – benötigte Komponenten wie z. B. dem Pantographen genutzt.

Da zur Wahrung der Betriebssicherheit gewisse Ladezeiten sicherzustellen sind, erfordert die Gelegenheitsladung gegebenenfalls eine Erhöhung der Wendezeiten, was zu Anpassungen in der Umlauf- und Betriebsablaufplanung führt.

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Grundlagentechnologiebetrachtung des Batteriebusystems

Bei Sicherstellung der erforderlichen Ladevorgänge kann ein Gelegenheitslader quasi zeitlich unbegrenzt eingesetzt werden und somit den Dieselbus vollständig ersetzen.

Die Abhängigkeit der Gelegenheitslader von den vorgesehenen Zwischenladepunkten schränkt generell den flexiblen Einsatz der Gelegenheitslader im Liniennetz stark ein. Im Zuge betrieblicher Planungen, bspw. während kurz- (wegen Baustellen) oder langfristiger (Umstellung des Liniennetzes) Umlaufanpassungen, sind die Ladepunkte als zusätzliche fixe Randbedingung in die Planung aufzunehmen.

Sobald einzelne Ladepunkte durch eine Vielzahl von Bussen genutzt werden, kann ein Investitionskostenvorteil erzielt werden.

2.2 Antriebssystem

In Bussen mit alternativem Antrieb kommen vornehmlich drehstrombasierte Synchron- oder Asynchronmotoren zum Einsatz. Neben einem einfachen technischen Aufbau weisen diese Elektromotoren einen hohen Wirkungsgrad im Vergleich zu Dieselmotoren auf.

In Dieselbussen wird generell ein einzelner Motor eingesetzt, der die gesamte Traktionsleistung aufbringt. Das Pendant der alternativen Antriebe stellt dazu das Zentralmotorkonzept dar. Darüber hinaus können Elektrobusse auch mit mehr als einem Elektromotor angetrieben werden. Solche Systeme werden üblicherweise als radnahe Antriebe oder Radnabenantriebe ausgeführt.

2.2.1 Zentralmotoren

Zentralmotoren sind bei Dieselbussen Standard. Viele der bereits vorhandenen Komponenten wie z. B. Antriebswelle und Differentialgetriebe verbleiben auch beim Elektrobuss (vgl. Abbildung 2).

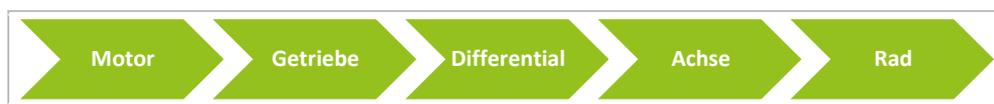


Abbildung 2: Antriebsstrang Zentralmotor

Zentralmotoren gelten als robust und vergleichsweise preiswert. Nachteilig sind dagegen die hohe Anzahl an mechanischen Schnittstellen, durch welche der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs negativ beeinflusst wird. Der Wirkungsgrad von Antriebssträngen mit Zentralmotor beträgt etwa 75 %. Diese Antriebsarchitektur kommt beispielsweise bei Bussen vom Typ „MAN Lions City E“ oder „Solaris Urbino Electric“ zum Einsatz.

2.2.2 Radnaher Antrieb

Beim Einsatz von radnahen Motoren verfügt der Elektrobus über eine Achse mit zwei Elektromotoren jeweils unmittelbar vor einem Rad. Die Kopplung zum Rad findet über ein Planetengetriebe statt, sodass der Motor nicht direkt im Radkörper angeordnet ist. Aufgrund der radnahen Bauweise können auf ein Differentialgetriebe sowie die beim Zentralmotor vorhandene Antriebswelle verzichtet werden (vgl. Abbildung 3).

Radnahe Motoren ermöglichen durch ihren Einbauort eine größere Flexibilität bei der Gestaltung des Innenraums. Mit sinkender Anzahl von Komponenten im Antriebsstrang, reduzieren sich außerdem auch die Energieverluste, im Vergleich zur Variante mit Zentralmotor. Der Wirkungsgrad von Antriebssträngen mit radnahen Motoren beträgt etwa 80 %. Diese Variante findet bei der häufig verwendeten Antriebsachse vom Typ „AVE 130“ des Herstellers ZF Anwendung.



Abbildung 3: Antriebsstrang radnaher Motor

2.2.3 Radnabenantrieb

Unter Radnabenmotoren sind Elektromotoren zu verstehen, die sich in den Felgen der Fahrzeuge befinden und die Radnabe tragen. Bei diesem Aufbau entfallen alle übrigen Komponenten des Antriebsstrangs, die Umdrehungen des Motors werden direkt auf das Rad übertragen (vgl. Abbildung 4). Aus diesem Grund stellen sie die effizienteste Antriebsmöglichkeit dar. Aufgrund ihrer räumlichen Anordnung im Radkörper ermöglichen zwar auch sie eine größere Flexibilität bei der Innenraumgestaltung, wegen der hohen ungefederten Masse kann sich ihre Anwendung jedoch negativ auf die Fahrdynamik auswirken.



Abbildung 4: Antriebsstrang Radnabenmotor

Der Wirkungsgrad von Antriebssträngen mit Radnabenmotor beträgt rund 90 %. Ein Vertreter dieser Antriebsart ist beispielsweise das Antriebsmodul „ZAwheel“ der Firma Ziehl-ABEGG. Bei den verfügbaren Elektrobussen hat sich das Antriebskonzept derzeit noch nicht durchgesetzt.

2.3 Energiespeicher

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor beziehen ihre Energie aus einem flüssigen oder gasförmigen Kraftstoff (i. d. R. Diesel oder Erdgas), der im Tank mitgeführt wird. Der Tank speichert also chemische Energie. Für Elektrofahrzeuge hingegen existieren verschiedene Möglichkeiten, die benötigte Antriebsenergie zu speichern. Unterschieden wird zwischen chemischen, elektrochemischen und elektrischen Speichern. Es existieren auch mechanische Energiespeicher (z. B. Schwungradspeicher), die aber wegen ihrer fehlenden Anwendung in Bussen nicht betrachtet werden.

Energiespeicher werden hinsichtlich folgender Kriterien unterschieden und bewertet:

- Gravimetrische Energiedichte (kWh/kg) / Leistungsdichte (W/kg)
- Volumetrische Energiedichte (kWh/l) / Leistungsdichte (W/l)
- Lade- und Entladegeschwindigkeiten (elektr.- u. elektrochemische Energiespeicher)
- Zyklenfestigkeit (elektr.- u. elektrochemische Energiespeicher)
- Selbstentladung (elektr.- u. elektrochemische Energiespeicher)
- Kosten

Wesentlicher Vorteil konventioneller Dieselfahrzeuge ist die hohe spezifische Energiedichte des mitgeführten Treibstoffes (11,8 kWh/kg). Die Energiedichte gibt an, wie viel Energie je Masseneinheit oder je Volumeneinheit gespeichert werden kann. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick zu den gravimetrischen Energiedichten von Diesel und Li-Ion-Batterien.

Energiequelle	Diesel	Li-Ion-Batterie
Gravimetrische Energiedichte	11,8 kWh/kg	0,15 kWh/kg

Tabelle 1: Vergleich gravimetrischer Energiedichten

2.3.1 Batteriespeicher

Bei Batteriespeichern handelt es sich um elektrochemische Speicher. Diese wandeln zugeführte elektrische Energie in elektrochemische Energie und speichern diese ab. Bei Bedarf wird die elektrochemische Energie wieder in elektrische Energie umgewandelt und an den Verbraucher abgegeben. Traktionsbatteriespeicher bestehen aus einer Vielzahl in Reihe und parallel verschalteter Einzelzellen und basieren vorwiegend auf Lithium-Ionen-Technologie. Diese werden in verschiedene Zellchemien – je nach Zusammensetzung der Anode und Kathode – untergliedert. In Elektrobussen kommen hauptsächlich Batterien auf NMC- (Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid) und LFP- (Lithium-Eisenphosphat) Basis zum Einsatz. Die Zellchemien haben spezifische Vor- und Nachteile hinsichtlich der Leistungs- und Energiedichte, Zyklenfestigkeit sowie Kosten und eignet sich somit für unterschiedliche Einsatzprofile.

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Grundlagentechnologiebetrachtung des Batteriebusystems

Der real nutzbare Energieinhalt der Traktionsbatterie ist geringer als die nominelle Auslegungsgröße und wird normalerweise vom Batteriemanagementsystem (BMS) der Batterie und/oder dem Fahrzeughersteller begrenzt. Gängige Werte sind:

- $SOC_{max} = 90 \%$ der Nennkapazität (zulässiger Höchstladestand)
- $SOC_{min} = 10 \%$ der Nennkapazität (zulässige Entladetiefe)

Die Batteriespeicher unterliegen komplexen Alterungsfaktoren, die sich auf deren Lebensdauer und gleichzeitig auf die Nutzungsdauer in der Traktionsanwendung auswirken. Die Alterungsfaktoren untergliedern sich in:

- Kalendarische Alterung: abhängig von der Temperatur und dem SOC
- Zyklische Alterung: abhängig vom SOC-Hub, der Strom-Rate (auch: C-Rate) sowie der Temperatur

Nach allgemeiner Definition gilt eine Batterie als gealtert und damit nicht mehr für die Traktionsanwendung geeignet, wenn ihre Kapazität auf 80 % der initialen Nennkapazität gesunken ist oder sich der Innenwiderstand auf 200 %, ebenfalls bezogen auf den initialen Wert, erhöht hat. Die meisten Batteriespeicher müssen nach aktuellem Stand der Technik mindestens einmal während der Nutzungszeit des Fahrzeugs (ca. 12-15 Jahre) getauscht werden.

Der Hochvoltenergiespeicher hat einen wesentlichen Anteil am ökologischen Fußabdruck des Gesamtfahrzeugs. Dementsprechend sorgfältig sollte die Batterietechnologie in Verbindung mit den enthaltenen Inhaltsstoffen der Zellchemie gewählt werden. Es ist zudem empfehlenswert, bspw. über zusätzliche Dienstleistungen, den Gesundheitszustand des Energiespeichers kontinuierlich über ein datentechnisches Monitoring-System zu überwachen. Mit entsprechender Expertise kann damit eine Nutzungsdauer über die allgemein definierten Lebensdauerengrenzen hinaus in Betracht gezogen werden. Alternativ können Anwendungen im Second-Life-Bereich ökonomische Anreize bieten.

Das Recycling von Lithium-Ionen-basierten Energiespeichern ist aktuell noch im Entwicklungsstadium. Hier wird in den kommenden Jahren ein deutlicher Entwicklungssprung erwartet, der mit der Menge an recyclebaren Speichern und der anhaltend hohen Nachfrage an Materialien für die Zellherstellung einhergeht.

2.4 Heizungs- und Klimatisierungskonzept

2.4.1 Energiebedarf

Speziell bei den alternativen Antrieben bildet der Energiebedarf der Nebenverbraucher einen wesentlichen Bestandteil des Gesamtenergiebedarfs ab. Der elektrische Antrieb verfügt zwar über einen höheren Wirkungsgrad, aufgrund der reduzierten oder gänzlich fehlenden Abwärme des Verbrennungsmotors werden jedoch zusätzliche Heizelemente

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Grundlagentechnologiebetrachtung des Batteriebusystems

zur Temperierung des Innenraums erforderlich. Generell gilt, je niedriger die Außentemperaturen, desto größer wird der Bedarf an Heizenergie im Fahrzeug (vgl. Abbildung 5).

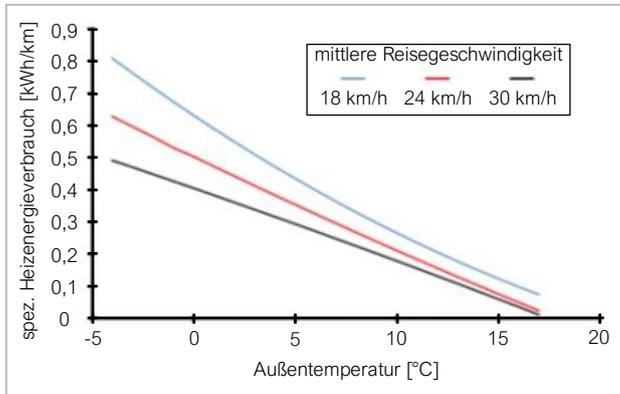


Abbildung 5: Heizenergiebedarf eines Solobusses

Ein 12-m-Dieselmotor verfügt über einen 150 l-Tank. Der Tankinhalt von 150 l Diesel entspricht einer Energie von ca. 1.479 kWh und ermöglicht eine Reichweite von 395 km. Rund 33 % dieses Energiegehalts wird vom Motor in mechanische, also Antriebsenergie umgewandelt, weitere 33 % gehen dem System als Abgaswärme verloren, die verbleibenden 33 % werden als Wärme an den Kühlkreislauf abgegeben (vgl. Abbildung 6). Von der an den Kühlkreislauf abgegebenen Wärmeenergie (~493 kWh) können rund 400 kWh zum Heizen des Fahrgastinnenraums genutzt werden. Um eine ausreichende Temperierung sicherzustellen, verfügen Dieselmotoren für gewöhnlich über eine zusätzliche Heizanlage mit einer Heizenergie von 740 kWh, sodass eine Gesamtheizenergie von 1.140 kWh bereitgestellt werden kann.

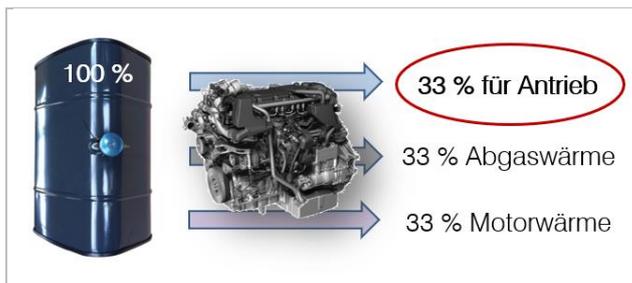


Abbildung 6: Energiebilanz Dieselmotor

Batteriebusse verfügen im Vergleich zum Dieselmotor über einen sehr effizienten Antrieb (Elektromotor $\eta = 0,98$). Dies bedeutet jedoch auch, dass kaum Abwärme des Antriebs zum Heizen des Innenraums genutzt werden kann. Die äquivalent zum Dieselmotor erforderliche Energie von 1.140 kWh muss vollständig von der Heizanlage aufgebracht werden. (Abbildung 7).

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Grundlagentechnologiebetrachtung des Batteriebusystems

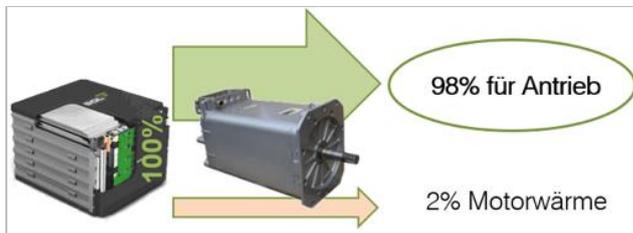


Abbildung 7: Energiebilanz Batteriebus

Eine Gegenüberstellung der Energiebedarfe (vgl. Tabelle 2) verdeutlicht, dass der Bedarf der Heizanlage bei Batteriebussen den des Antriebs übersteigt. Dies wird besonders dann zur Herausforderung, wenn, z. B. zur Begrenzung von Schadstoffemissionen, die Energie nicht durch eine Dieselheizung erzeugt werden darf und ebenfalls vom Traktionspeicher bereitgestellt werden muss. Damit sei der wesentliche Einfluss des Heizkonzeptes auf den Gesamtenergiebedarf von Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb erklärt.

Laufleistung 395 km, Heizung 21 h	Diesibus	Batteriebus
Gesamtenergiebedarf	2.219 kWh	1.640 kWh
Gesamtenergie Fahren	1.479 kWh	500 kWh
Zusatzenergie Heizung	740 kWh	1.140 kWh

Tabelle 2: Fahrzeugenergiebedarf Diesibus und Batteriebus

2.4.2 Heizanlage

Die Tagesmitteltemperaturen im deutschen Raum können, mit lokalen Abweichungen, zwischen -20 und +30 °C variieren. Dementsprechend ist es erforderlich, die Temperatur im Innenraum von Bussen zu steuern, also den Innenraum zu heizen oder zu klimatisieren. Dafür kommen je nach vorherrschendem Klima, den Vorgaben zur Innenraumtemperatur und dem Fahrzeug-/ Antriebskonzept verschiedene technische Systeme zur Anwendung.

Bei Diesebussen wird die Heizenergie in der Regel einerseits in Form der Motorabwärme über das Kühlsystem sowie von einer zusätzlichen Brennstoffheizung (i. d. R. Diesel) bereitgestellt. Das allgemein erklärte Ziel, Schadstoffemissionen lokal durch den Einsatz alternativer Antriebe zu reduzieren, macht jedoch andere Lösungen erforderlich. Hier sind es besonders die Batteriebusse, bei denen das Heizkonzept einen wesentlichen Faktor zur Bemessung des gesamten Energiespeicherkonzeptes/der Traktionsbatterien darstellt. Zur Erzeugung von Heizenergie in Bussen kommen im Wesentlichen fünf Systeme zum Einsatz:

- Hybridheizung
- Wärmepumpe
- Elektrischer Widerstand

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Grundlagentechnologiebetrachtung des Batteriebusystems

- Brennstoffheizung

In der Brennstoffheizung werden üblicherweise Diesel, Heizöl oder Erdgas als Energieträger in Heizenergie umgewandelt. Außer zur Steuerung ist hier keine elektrische Energie erforderlich. Mit Verwendung einer Brennstoffheizung ist ein lokal emissionsfreies Fahren nicht mehr möglich. Jedoch können die lokalen Schadstoffemissionen durch den Einsatz synthetischer GtL-Kraftstoffe auf Erdgasbasis (GtL, engl. Gas to Liquid) vermindert werden.

2.4.2.1 Hybridheizung

Die Hybridheizung ist ein teilelektrisches Brennstoffheizsystem bestehend aus einer elektrischen Heizung, meist einer Wärmepumpe, und einer fossilen Zusatzheizung. Bei mäßigen Temperaturen von über 5 °C ist eine verhältnismäßig geringe Heizleistung erforderlich, wobei die elektrische Heizung einsetzt. Leistungsspitzen, die bei Außentemperaturen von unter 5 °C erforderlich sind, werden über eine zusätzliche Brennstoffheizung abgedeckt.

2.4.2.2 Wärmepumpe

Bei der Wärmepumpe befindet sich ein Kältemittel in einem geschlossenen Kreislauf. Dieses wird über eine Pumpe verdichtet und so erwärmt. Diese Wärme wird dann genutzt, um den Innenraum zu Heizen. Wärmepumpen stellen eine effiziente Möglichkeit zum Klimatisieren (Heizen und Kühlen) dar. Die Leistungsfähigkeit von Wärmepumpen wird in Leistungszahlen angegeben:

- COP, Coefficient of Performance für das Heizen oder
- EER, Energy Efficiency Ratio für das Kühlen.

Die Leistungszahlen geben das Verhältnis von erzeugter Wärme-/Kälteenergie zu der dafür aufgewendeten elektrischen Energie wieder. Abhängig sind diese Zahlen von der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur sowie dem verwendeten Kältemittel und der Bauart der Wärmepumpe. Moderne Wärmepumpen verfügen über einen COP von 2,0 (bei -10 °C) bis hin zu über 3,0 in Temperaturbereichen oberhalb von 0 °C. Sie erzeugen also mehr Wärmeenergie als dafür an elektrischer Energie aufgewandt werden muss und stellen die effizienteste Heizanlage dar.

Als Kältemittel kommen in Wärmepumpen zwei unterschiedliche Stoffe zum Einsatz: R134a (Tetrafluorethan) oder R744 (CO₂). R134a bietet bis zu einer Umgebungstemperatur von 5 °C eine gute Energieeffizienz; R744 von +20 °C bis -20 °C. R134a gilt als höchst klimaschädlich und darf deshalb seit Anfang 2017 nicht mehr in Klimaanlage neuer Kfz verwendet werden. Die Anwendung im Busbereich ist noch zulässig; in Verbindung mit dem Verbot im Kfz-Bereich war jedoch auch ein Preisanstieg sowie eine Verschlechterung der Verfügbarkeit zu verzeichnen.

2.4.2.3 Widerstandsheizung

Bei der elektrischen Widerstandsheizung wird elektrische Energie direkt in Wärme umgewandelt. Hierbei handelt es sich um eine vergleichsweise einfache Art Heizenergie zu erzeugen. Ein wesentlicher Nachteil besteht jedoch darin, dass sich der Energiebedarf besonders an kalten Tagen verdoppeln kann. Dies hat speziell bei Batteriebussen einen erheblichen Verlust an Reichweite zur Folge, weshalb die Widerstandsheizung häufig nur als Zusatzheizgerät eingesetzt wird.

2.4.3 Klimatisierung

Die Kühlung der Fahrzeuge erfolgt üblicherweise durch eine Klimaanlage, deren Kompressor beim konventionellen Diesel direkt an den Motor gekoppelt ist und beim Elektrobus elektrisch betrieben wird. Darüber hinaus kann die Kühlung zum Teil auch über eine Wärmepumpe mit Kühlfunktion erfolgen. Die Energiebedarfe der verschiedenen Kühlsysteme unterscheiden sich nur unwesentlich. Da diesel- wie elektrisch angetriebene Fahrzeuge gleichermaßen Energie zum Kühlen aufwenden müssen und aufgrund der mitteleuropäischen Klimabedingungen die Beheizung der Fahrzeuge maßgebend energieintensiver ist, hat die Klimatisierung keinen entscheidenden Einfluss auf die Wahl des Fahrzeugkonzepts.

2.5 Elektrische Energiebereitstellung

Die elektrische Energie wird grundsätzlich über ein Netzwerk, das sogenannte Stromnetz, übertragen und verteilt. Die Energiebereitstellung setzt einen Anschluss an die lokale Versorgung voraus. Zur Ladung von Elektrobussen muss eine ausreichende Anschlussdimensionierung sichergestellt sein. Selbst bei kleineren Flotten (< 50 Fahrzeuge) kann der Leistungsbedarf die Leistungsreserve oder -fähigkeit des vorhandenen Transformators, der für die Versorgung des Betriebshofes zuständig ist, übersteigen. Um eine zuverlässige und leistungsfähige Ladung zu ermöglichen, kann es erforderlich sein, neben den Ladegeräten ein Verteilungsnetz aufzubauen.

Die Energiezuführung elektrischer Busse muss primär am Betriebshof sichergestellt sein. Eine vollständige Ladung der Fahrzeuge auf der Strecke ist durch den Bedarf an Platz, Zeit und Personal in den meisten Fällen ökonomisch unzureichend darstellbar. Ausschlaggebend ist letztendlich das Ladekonzept. Dieses bildet sowohl die Anzahl und Anordnung der Ladegeräte unter Berücksichtigung der Betriebssicherheit, des Personenschutzes sowie der operativen Prozesse, als auch die maximal notwendige Anschlussleistung im Betriebshof oder auf der Strecke ab.

Die Anschlussleistung im Betriebshof ist vor allem beim Depotlader-Konzept bedeutsam. Eine lokale Nähe zur Stromerzeugung (bspw. Kraftwerk) kann hinsichtlich der Erschließung ökonomisch vorteilhaft sein. Die elektrische Energie wird über ein Verteilnetz bezogen, das wiederum vom Verteilnetzbetreiber (VNB) unterhalten wird. Dieser gibt die technischen

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Grundlagentechnologiebetrachtung des Batteriebusystems

Bedingungen zum Anschluss an das Versorgungsnetz vor. Handelt es sich um ein Mittelspannungsnetz, sind die „Technischen Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb“ (kurz: TAR Mittelspannung, VDE-AR-N 4110) zu beachten.

Je nach Leistungsbedarf ist ein Anschluss an das Mittelspannungsnetz (10/20/30 kV) oder an das Hochspannungsnetz (110 kV) vorzunehmen. Zur Trennung zwischen Verteil- und Kundennetz (Busbetriebshof) ist eine Übergabestation einzurichten. Dort sind zu Mess- und Abrechnungszwecken Geräte zu installieren. Im Bedarfsfall kann die Verbindung zum Versorgungsnetz getrennt werden.

Über das betriebshofinterne Verteilnetz wird die Energie auf die Ladegeräte verteilt. Das Verteilnetz kann nach verschiedenen Konzepten als Stich- oder Ringnetz aufgebaut werden. Innerhalb des Verteilnetzes sind Transformatoren einzubinden, welche die Mittelspannung in Niederspannung wandeln. Aus dieser Niederspannung, allgemein 3AC-400 V werden die Ladegeräte gespeist. Die Ladegeräte wirken als Gleichrichter, die

ausgangsseitig Strom und Spannung stellen können. Die Ladegeräte versorgen die elektrifizierten Busse via Kabel oder Pantographen.

2.6 Energiezuführung

Elektrische Energie wird grundsätzlich über Ladegeräte in das jeweilige Zielsystem, in dem Falle ein elektrifizierter Bus, übertragen. Die Ladung erfolgt derzeit generell leitungsgebunden und über eine form- oder kraftschlüssige (Steck)-Verbindung. Die Ladevorgänge können über Plug-In-Systeme oder Docking-Systeme ausgeführt werden.

Folgende Faktoren beeinflussen den Nachladevorgang:

- Häufigkeit von Ladungen in den Fahrzeugumläufen
- Verweildauer an der Ladestation
- Umgebungstemperatur
- Verfügbarkeit der Ladestation
- Leistungsfähigkeit der Ladestation

Folgende Eigenschaften des elektrochemischen Speichers beeinflussen dessen Stromaufnahme beim Nachladevorgang:

- Elektrische Dimensionierung (Zellverschaltung, Energieinhalt etc.)
- Ladezustand (engl. State of Charge, SoC)
- Alterungszustand (engl. State of Health, SoH)
- Temperierung

2.7 Technologievergleich BEB/DL und BEB/GL

In Tabelle 3 werden BEB/DL und BEB/GL nach technischen, betrieblichen, wirtschaftlichen, planerischen und soziologischen Kriterien vergleichend gegenübergestellt.

Bewertungskriterium	Depotlader	Gelegenheitslader
Technisch		
Batteriespeicherkapazität / Platzkapazität	Größere Batterie → höheres Gewicht → höhere Einschränkungen Personenkapazität	Kleinere Batterie → geringeres Gewicht → weniger Einschränkungen Personenkapazität
Energieverbrauch	Höher größere Batterie → höheres Gewicht → höherer Verbrauch	Geringer kleinere Batterie → geringeres Gewicht → geringerer Verbrauch
Leistungsbedarf Betriebshof	Höher Energiekonzentration auf Betriebshof	Geringer Energieverteilung auf Betriebshof und Strecke
Betrieblich		
Flexibilität/ Linienbindung/ Angebotserweiterung	Höhere Flexibilität Einsatzbegrenzung durch Reichweite	Geringere Flexibilität starke Bindung an Ladeinfrastruktur Strecke
Tagesfahrleistung	Begrenzt geringere Speicherkapazität → geringere Reichweite	Nicht begrenzt Nachladung während des Betriebs auf der Strecke → höhere Reichweite
Verspätungslage	Nicht relevant Ladung nicht auf der Strecke → keine Beeinflussung der Ladezeiten durch Verspätungslagen	Relevant Ladung auf der Strecke → Beeinflussung der Ladezeiten durch Verspätungslagen Verspätung → Reduzierung der Wende- & Pufferzeit → ggf. betriebliche Einschränkungen → ggf. betriebliche Anpassungen (Erhöhung Wende- und Pufferzeit)

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Grundlagentechnologiebetrachtung des Batteriebusystems

Bewertungskriterium	Depotlader	Gelegenheitslader
Wirtschaftlich		
Investitionskosten Fahrzeug	Höher größere Batterie → höhere Kosten	Geringer kleinere Batterie → geringere Kosten
Investitionskosten LIS	Geringer ausschließlich LIS auf dem Betriebshof → keine kostenintensive LIS Strecke erforderlich	Höher kostenintensivere LIS Strecke erforderlich → Relativierung der Kosten LIS durch Nutzung einer LIS durch mehrere Fahrzeuge
Planerisch		
Planerischer Aufwand	Geringer Errichtung LIS auf privatem Gelände → geringerer Abstimmungsbedarf, geringere Anforderungen an Genehmigungsfähigkeit, geringeres Risiko der baulichen Umsetzbarkeit	Höher Errichtung LIS im öffentlichen Raum → höherer Abstimmungsbedarf, höhere Anforderungen an Genehmigungsfähigkeit, höheres Risiko der baulichen Umsetzbarkeit
Zeitliche Realisierbarkeit	Unkritisch Errichtung LIS auf priv. Gelände → geringe Abhängigkeiten von externen Faktoren Integration unbekannter Technologien → Einfluss auf Realisierungszeitraum	Verzögerung möglich Errichtung LIS im öffentlichen Raum → höherer planerischer Aufwand → höherer Zeitaufwand
Soziologisch		
Akzeptanzverhalten	Positive Effekte LIS auf Privatgelände → kein Eingriff ins Stadtbild, was durch Öffentlichkeit negativ bewertet werden könnte	Positive oder negative Effekte LIS im öffentlichen Raum → Eingriff ins Stadtbild, könnte negativ bewertet werden oder Sichtbarmachen innovativer Technologien, was positiv bewertet werden könnte Geräuschemissionen der LIS an Endpunkten → negative Wahrnehmung

Tabelle 3: Technologievergleich BEB/DL und BEB/GL

3 Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

3.1 Fuhrparkanalyse

Der aktuelle Flottenbestand sowie zukünftige Beschaffungen werden aufgenommen und analysiert. Der Beschaffungsplan, der den sukzessiven Fahrzeughochlauf emissionsfreier Fahrzeuge bei der SR aufzeigt, bildet die wesentliche Bezugsgröße für die zu definierenden Ausbaustufen bei der geplanten schrittweisen Umstellung des Gesamtfuhrparks. Der Beschaffungsplan ist zudem maßgebend für die folgenden Untersuchungsschritte.

Die SR betreiben aktuell insgesamt 86 Dieselbusse, davon 63 Solo- und 23 Gelenkbusse. Jährlich ist die Ersatzbeschaffung von 6-12 % der Flotte vorgesehen. Perspektivisch sollen alle Busse emissionsfrei verkehren.

Im Ergebnis eines umfassenden Technologievergleichs zwischen den alternativen Antriebskonzepten Oberleitungsbus, Batteriebus und Brennstoffzellenbus, wurde der Batteriebus als das für den Einsatz im Remscheid geeignetste Antriebssystem identifiziert.

Die Beschaffungsstufen orientieren sich an der bisherigen Praxis, Fahrzeuge für zwei bis drei Jahre gemeinsam auszuschreiben und in Jahresscheiben abzurufen. So ergeben sich für die Jahre 2024-2028 zwei Beschaffungsstufen. Ab dem Jahr 2029 sind weitere Beschaffungsstufen vorzusehen.

Der Fahrzeughochlauf und die Beschaffungsstufen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Jahr	Beschaffungsstufen	Anzahl Solobusse	Anzahl Gelenkbusse	gesamt
2024	1	10	3	13
2025		8	0	21
2026	2	9	0	30
2027		5	4	39
2028		10	5	54
ab 2029	3 f	21	11	32
gesamt		63	23	86

Tabelle 4: Beschaffungsstufen Fahrzeuge

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

Im Dialog mit der SR wurde die Fahrzeugkonfiguration für den Elektrobus vorgenommen, wobei die im folgenden aufgeführten Anforderungsparameter definiert wurden.

- Solobus
 - 12 m
 - 3-türig
 - 19,5 t zulässiges Gesamtgewicht
 - 70 Plätze (Servicequalität)
- Gelenkbus
 - 18 m
 - 3-türig
 - 28 t zulässiges Gesamtgewicht
 - 110 Plätze (Servicequalität)
- Elektrisches Heizungskonzept: Wärmepumpe; keine fossile Zusatzheizung

3.2 Ladeinfrastrukturanforderungen

Die Integrationsplanung der für den Batteriebusbetrieb erforderlichen Infrastruktur im Betriebshof erfolgt unter Berücksichtigung folgender Kriterien:

- Sicherstellung der notwendigen Netzanbindung unter Berücksichtigung des Leistungsbedarfs entsprechend des Fahrzeughochlaufs
- Herstellen der elektrischen Grundversorgung auf dem Betriebshof
- Abstellen und Laden der Elektrobusse in der vorhandenen Abstellhalle
- Optimale Integration der Ladegeräte in den Betriebshof
- Einpassen der Ladepunkte in die Fahrzeugabstellung
- Erfüllen der brandschutztechnischen Vorgaben

Im Abstellbereich des Betriebshofes Neuenkamper Straße ist für jeden Elektrobus ein Ladegerät vorzusehen. Die elektrische Energiezuführung zwischen Ladeinfrastruktur und Fahrzeug soll über das Docking-Station-System erfolgen. Aus Platzgründen sollen fahrzeugseitige Pantographen zum Einsatz kommen. Für jeden Elektrobus soll ein Ladepunkt mit Ladehaube und Depotbox vorgesehen werden. Um die spezifischen Anforderungen der VDV-Schrift 825 an den Brandschutz zu erfüllen, sind Brandschutzwände vorzusehen.

Die Unterschiede des BEB/DL und des BEB/GL werden nicht spezifiziert aufgeführt, da deren Unterschiede in Auslegung und Anforderungen als nicht relevant hinsichtlich der Bewertung der Integrationsfähigkeit eingeschätzt werden.

3.3 Anforderung an die Abstellung

Bei der Busaufstellung darf die minimal zulässige Fluchtwegbreite nicht unterschritten werden. Das gilt nicht nur zwischen den Bussen, sondern auch zu Pfeilern oder Stützen, Technik

und anderen Einbauten. Im Abstellkonzept wird ein Verkehrsweg zwischen den Fahrzeugen von 0,90 m in der Planung angesetzt. Dies entspricht den Vorgaben der VDV-Schrift 825. Damit ist gewährleistet, dass sich das Reinigungspersonal während des Ladevorganges mit Reinigungswagen zwischen den Bussen für die Innenreinigung bewegen können und das ungenaue Abstellen der Busse in der Y-Achse ausgeglichen werden können.

Neben der Abstellung der Fahrzeuge sind Servicebereiche zu integrieren. Die Servicetätigkeiten umfassen die Fahrtfertigmachung mit Auffüllen der notwendigen Betriebsstoffe, die Innen- und Außenreinigung der Elektrobusse sowie die Überprüfung der Betriebs- und Verkehrssicherheit. Weiterhin soll durch das Werkstattpersonal der Bus-Full-Service (Instandhaltung nach DIN 31051) durchgeführt werden. Dieser schließt die Inspektion, Instandsetzung, Wartung, Reparatur von Unfallschäden sowie die Beseitigung von Vandalismus ein.

Die Unterschiede des BEB/DL und des BEB/GL werden nicht spezifiziert aufgeführt, da deren Unterschiede in Auslegung und Anforderungen als nicht relevant hinsichtlich der Bewertung der Integrationsfähigkeit eingeschätzt werden.

Die Fahrtbeziehungen gegenüber dem Dieselbusbetrieb bleiben annähernd gleich. Nach dem Einrücken in den Betriebshof sind die Fahrzeuge einem Service zu unterziehen. Dort werden Betriebsstoffe aufgefüllt (Wischwasser und ggf. Heizöl), technische Durchsichten durchgeführt und die Außenwäsche ausgeführt. Danach wird das Fahrzeug abgestellt. In der Abstellhalle erfolgt die Ladung der Batterien und die Vorkonditionierung für den nächsten Einsatz.

3.4 Anforderung des Brandschutzes

Der Brandschutz von Dieselbussen und E-Bussen unterscheidet sich deutlich. Durch den Einsatz von alternativen Antriebskonzepten sind die Gefahren neu zu bewerten. Neu einzuschätzen sind die Brandgefahr, die Brandlast und der Brandverlauf, die von elektrischen Antriebssystemen, Energiespeichern, Kältemitteln und deren Infrastruktur ausgeht.

Der Betreiber ist nach dem Arbeitsschutzgesetz und der Betriebssicherheitsverordnung verpflichtet, in einer Gefährdungsbeurteilung die Gefahren, die von den technischen Einrichtungen und Geräten ausgehen können, einzuschätzen, zu beurteilen und daraus abzuleitende notwendige Schutzmaßnahmen umzusetzen.

Es sind die brandschutztechnische Maßnahmen zu bewerten, die sicherstellen, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch vorgebeugt wird, bei Brand die Rettung von Menschen möglich ist sowie bei einem Brand wirksame Löscharbeiten durchgeführt werden können.

Im Folgenden werden die für den Elektrobus generell vorgesehenen brandschutztechnischen Maßnahmen analysiert und hinsichtlich Wirksamkeit und Relevanz für den Anwendungsfall bewertet.

Die Fahrzeugabstellung erfolgt in der vorhandenen Abstellhalle. Um im Brandfall Brandüberschlag zu vermeiden, wird laut VDV-Schrift 825 und VDS-Schrift 0825 die Errichtung von Brandabschnitten mit maximal 20 Fahrzeugen in einer Abstellanlage für Elektrobusse empfohlen. Um diese Anforderung zu erfüllen, ist die Abstellhalle in Brandabschnitte zu teilen. Dazu sind **Brandschutzwände** und bei Bedarf feuerbeständige, dicht- und selbstschließende Brandschutztore zu errichten.

Die für Dieselbusse bereits vorgeschriebenen Brandunterdrückungssysteme (Motorraumlöschsystem) können nicht für E-Busse genutzt werden, da es bisher kein adäquat wirksames Löschmittel oder -system gibt. Daher ist die frühzeitige Branderkennung durch **Batteriemonitoringsysteme** von erhöhter Bedeutung um Anomalien rechtzeitig zu erkennen und ggf. den Ladeprozess zu unterbrechen sowie entsprechende Stellen zu informieren.

Ein Bus mit einer potentiell beschädigten Batterie sollte auf einer **Beobachtungsfläche** abgestellt werden, so dass ein zeitlich verzögerter Fahrzeugbrand nicht auf benachbarte Objekte übergreifen kann. Die Abmaße der Abstellfläche orientieren sich an den Maßen des größten Fahrzeugs zuzüglich eines Positionieraufschlags von 0,5 m zu jeder Seite. Die Beobachtungsfläche muss eine Mindestbreite von 5 m zu jeder Seite des Busses besitzen. Der Untergrund ist mit nichtbrennbaren und versiegelnden Materialien, sowie einem Entwässerungsanschluss zum Auffangen austretender Betriebsstoffe bzw. zur Rückhaltung von Löschwasser auszuführen. Die Beobachtungsfläche kann im Normalbetrieb zur Abstellung von Bussen oder Ersatzteilen genutzt werden, sofern sichergestellt ist, dass eine Räumung im Bedarfsfall möglich ist.

3.5 Werkstattanforderungen

Mit dem Nutzer werden die Anforderungen an den Werkstattausbau definiert, die aus der Instandhaltung (Inspektion, Wartung, Instandsetzung) der batterieelektrischen Busse resultieren und deren Integrationsfähigkeit bewertet.

Die Stadtwerke Remscheid plant die Wartung, Inspektion und Instandsetzung sowie zusätzliche Instandhaltungsmaßnahmen für HV-Fahrzeuge – analog zum aktuellen Fuhrpark – komplett in Eigenleistung vorzunehmen. Inbegriffen sind der Störungsdienst und die Rufbereitschaft während der Nachtzeiten. Innerhalb der Gewährleistungsfristen der Fahrzeuge bzw. bei Arbeiten, welche die Kompetenzen und Instandhaltungstiefe des Betriebs überschreiten, soll auf den Vor-Ort-Service des Herstellers zurückgegriffen werden.

Die Stadtwerke Remscheid verfügen auf ihrem Betriebshof über eine Buswerkstatt, jedoch spezielle Anlagen und Ausrüstungsgegenstände für Arbeiten an Fahrzeugen mit

Hochvoltsystemen sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht vorhanden. Die Ertüchtigung der Werkstatt für den Batteriebusbetrieb ist demnach erforderlich. Es sind mobile und stationäre Dacharbeitsstände, Flurfördertechnik, Spezialwerkzeuge, sonstige Betriebsmittel und Spezialwerkzeuge sowie persönliche Schutzausrüstung vorzusehen.

3.6 Bewertung

Für das Laden der Batteriebusse im Depot ist eine entsprechende **Ladeinfrastruktur** mit Transformatoren und Ladegeräten vorzusehen. Zudem sind die spezifischen Anforderungen an den Brandschutz zu erfüllen. Ebenfalls sind zusätzliche Anforderungen an den Werkstattbereich zu berücksichtigen und zu integrieren. Als planerische Vorgabe liegt der Betriebshofanalyse die Schrift 825 „Anforderungen an Betriebshöfe und Werkstätten beim Einsatz von Linienbussen mit sauberen und/oder emissionsfreien Antrieben“ vom Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) zugrunde.

Der Betriebshofstandort ist unter Berücksichtigung des bestehenden Grundlayouts mit Abstellhalle, Werkstatt und Verwaltungsgebäude sowie den Fahrtbeziehungen und Betriebsabläufen auf dem Betriebshof, hinsichtlich der Integrationsfähigkeit der batteriebuspezifischen Komponenten und Betriebsabläufe zu bewerten. Augenmerk soll auf die unterschiedlichen Anforderungen beim Einsatz von Depot- oder Gelegenheitsladern gelegt werden.

Nach Analyse der technisch-betrieblichen Anforderungen an den Betrieb von Batteriebussen, wird der Bestandsbetriebshof zum Betreiben von Batteriebussen als geeignet eingeschätzt. Der BEB/DL und BEB/GL wird hier gleichermaßen bewertet.

Zur Errichtung der Ladeinfrastruktur wurden geeignete Flächen ermittelt. Die Abstellhalle ist in einem guten Zustand und wird als ausreichend hoch zur Installation von Ladehauben eingeschätzt.

Da das Hallendach zur Aufnahme der technischen Komponenten (Ladehauben, Depotboxen und Kabelanlage) aus statischen Gründen als nicht tragfähig eingestuft wurde, ist die Errichtung einer Traverse als Unterkonstruktion zum Hallendach vorgesehen.

Die **Abstellung** der Fahrzeuge erfolgt wie bisher in der vorhandenen Abstellhalle.

Die aufgeführten **brandschutztechnischen** Maßnahmen wurden für den Einsatz von BEB/DL und BEB/GL bewertet.

Die Brandlast ist beim BEB/DL und BEB/GL gleich einzuschätzen. Diese geht im Wesentlichen aus den Fahrzeugkomponenten (Karosserie, Interieur) hervor. Die unterschiedlichen der Batterien beeinflussen lediglich die Branddauer.

Die Anzahl der Arbeitsstände ist für die Instandhaltung von Batteriebussen ausreichend.

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Fuhrpark- und Betriebshofanalysen

Das **Werkstattgebäude** ist grundsätzlich geeignet, um Batteriebusse in der bisherigen Instandhaltungstiefe zu betreuen.

Die Instandsetzungsarbeitsstände in der Werkstatthalle weisen eine lichte Höhe von ca. 4,9 m auf. Diese wird durch die zur Spurrichtung querliegende Tragkonstruktion des Hallendachs limitiert. Da sich die Tragkonstruktion und Leitungen im Kopfbereich der Mitarbeiter befinden würde, ist das Arbeiten auf den Dacharbeitsständen nach Arbeitsstättenrichtlinie unzulässig. Zudem würden beim angehobenen Bus lediglich 1,5 m zur Verfügung stehen, was ebenfalls nach Arbeitsstättenrichtlinie nicht zulässig ist. Um die lichte Arbeitshöhe auf den Dacharbeitsständen zu erhöhen und eine Krananlage auf diesen Bereichen zu integrieren, ist eine Hallenanhebung von ca. 2,5 m erforderlich.

4 Strecken- und Einsatzanalysen

4.1 Betriebliche Bewertung des Depotladers

Es werden die durch den Auftraggeber zur Verfügung gestellten Umlaufpläne und Umlaufuntersuchungen hinsichtlich des Depotladereinsatzes bewertet. Maßgebende Kriterien sind hierbei der Fahrzeugmehrbedarf sowie der Fahrplanwirkungsgrad.

Für die Energiebilanzierung der Umläufe wurden Referenzumläufe ermittelt und deren spezifischer Energiebedarf bestimmt. Reichweiten zwischen 250 km und 290 km sollen durch den Batteriebusseinsatz erbracht werden. Im Ergebnis der Umlaufbewertung wurde ermittelt, dass 8 von 100 Fahrzeugumläufen nicht abbildbar sind. Je Umlauf, der nicht mit Batteriebussen fahrbar ist, erhöht sich der Fahrzeugbedarf um 0,275 Busse.

Beim Einsatz des Depotladers ist ein Fahrzeugmehrbedarf von 3 Bussen erforderlich. Durch zusätzlich notwendige Leerfahrten vermindert sich der Fahrplanwirkungsgrad um 0,66 %.

4.2 Betriebliche Bewertung des Gelegenheitsladers

Es werden die durch den Auftraggeber zur Verfügung gestellten Umlaufpläne und Umlaufuntersuchungen hinsichtlich des Gelegenheitsladereinsatzes bewertet. Hierbei werden maßgeblich die notwendigen Ladestandorte im Streckengebiet sowie der Fahrplanwirkungsgrad bewertet.

Für die Energiebilanzierung der Umläufe wurden Referenzumläufe ermittelt und deren spezifischer Energiebedarf bestimmt. Reichweiten zwischen 210 km und 240 km sollen durch den Batteriebusseinsatz erbracht werden. Es wurden Lademöglichkeiten an sieben Endpunkten im Stadtgebiet zu Grunde gelegt. Unter diesen Annahmen können 3 von 100 Fahrzeugumläufen nicht abgebildet werden. Je Umlauf, der nicht mit Batteriebussen fahrbar ist, erhöht sich der Fahrzeugbedarf um 0,275 Busse.

Beim Einsatz des Gelegenheitsladers ist ein Fahrzeugmehrbedarf von einem Bus erforderlich. Durch zusätzlich notwendige Leerfahrten vermindert sich der Fahrplanwirkungsgrad um 0,25 %.

5 Infrastrukturanforderungen und -bedarfe

5.1 Konzeption der Ladeinfrastruktur Strecke

Durch die SR werden Endpunkte als potentielle Ladestandorte im Liniennetz bestimmt. Diese werden hinsichtlich ihrer Realisierbarkeit analysiert und bewertet. Dazu wird ein Ladeinfrastrukturkonzept aufgestellt, in welchem die erforderlichen Ladeinfrastrukturkomponenten bestimmt, konfiguriert und ausgelegt werden. Im Ergebnis werden die Herausforderungen bei Umsetzung des erarbeiteten Ladeinfrastrukturkonzepts aufgezeigt.

Auf Grundlage von Umlaufsimulationen und einer Bewertung der baulichen und betrieblichen Gegebenheiten der Linienendpunkte wurden folgende Ladestandorte und Anzahl der Ladepunkte bestimmt:

- Lennep Bahnhof: 2 Ladepunkte
- Badeparadies H2O: 2 Ladepunkte
- Friedrich-Ebert-Platz: 2 Ladepunkte
- Reinshagen Schleife: 1 Ladepunkt
- Honsberg Sportplatz: 1 Ladepunkt
- Falkenberg/Sperberstr.: 1 Ladepunkt
- Ehringhausen Schleife: 1 Ladepunkt

An jedem Ladestandort sind folgende Ladeinfrastrukturkomponenten erforderlich:

- 1 Trafo-Ladetechnik-Station für Schnellladung mit 300 kW je Ladepunkt
- 1 Lademast mit Ladehaube je Ladepunkt
- Kabelanlagen zum Anschluss der Komponenten zwischen Trafo-Ladetechnik-Station und Lademasten
- Herstellen Netzanschluss entsprechend der benötigten Ladeleistung

An den Endpunkten, die als Ladestandorte auszubauen sind, sind nach Erfordernis verschiedene bauliche Maßnahmen, wie bspw. das Verstärken der Standfläche im Fahrbahnbereich auf Höhe des Lademastes oder das Herstellen eines Anfahrschutzes sowie von Ausrichtungs- und Orientierungshilfen, erforderlich.

5.2 Konzeption der Ladeinfrastruktur Betriebshof

Ausgehend davon, dass jeder Elektrobus an seinem Abstellort im Depot eine Vorrichtung zum Nachladen mit geringer Leistung während der nächtlichen Betriebspause benötigt, wird ein Ladeinfrastrukturkonzept erstellt. Dabei wird der Minimierung von Verlusten durch Leitungswege sowie der vorhandenen Platzverhältnisse Rechnung getragen.

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Infrastrukturanforderungen und -bedarfe

Maßgebend ist zudem das Abstellkonzept für die Fahrzeuge, welches im Kontext zum Ladeinfrastrukturkonzept erstellt wird.

Aufgrund des hohen Leistungsbedarfs erfolgt der Anschluss der Ladeinfrastruktur an das Mittelspannungsnetz. Der Anschluss an das Versorgungsnetz des Netzbetreibers EWR erfolgt über die Übergabestation. Von der Übergabestation wird die Leistung zu den Trafo-Ladetechnik-Stationen verteilt. In den Trafo-Ladetechnik-Stationen findet die Umspannung auf Niederspannung (Trafo) und die Gleichrichtung (Ladegerät) statt.

Das Ladegerät stellt die elektrische Leistung aus dem Stromnetz dem Batteriebus zur Verfügung. Die Ladung erfolgt mit Gleichstrom (DC). Die Kontaktstelle zum Fahrzeug wird über eine Ladehaube realisiert. Die Anzeige des Ladestatus sowie die Kommunikation zwischen Ladegerät und Fahrzeug erfolgen über die Depotbox am Ladepunkt. Die Kommunikation erfolgt über ISO 15118 und die Anbindung an weitere IT-Systeme über OCPP (Open Charge Point Protocol).

Im Abstellbereich des Betriebshofes Neuenkamper Straße ist für jeden Elektrobus ein Ladegerät, das jeweils eine Ladeleistung von 75-100 kW (BEB/GL) bzw. 150 kW (BEB/DL) bereitstellt, vorgesehen. Zudem ist ein Ladegerät mit einer Ladeleistung von 300 kW für Schnellladung einzuplanen. Am Abstellort erhalten die Elektrobusse eine dauerhafte Ladung, die einerseits zur Erhaltungsladung sowie zum Balancing des Traktionsspeichers und andererseits zur Vorkonditionierung des Fahrzeugs vor dem Ausrücken (Klimatisierung des Fahrgastraums und der Batterien, Druckluftanlage etc.) dient.

Die elektrische Energiezuführung zwischen Ladeinfrastruktur und Fahrzeug erfolgt über das Docking-Station-System. Aufgrund der begrenzten Flächenverfügbarkeit in der Abstellhalle, soll das Laden infrastrukturseitig über die Ladehaube und fahrzeugseitig über Pantographen erfolgen. Die Ladehauben sind an Traversen unterhalb der Hallendecke anzubringen. Für jeden Elektrobus ist ein Ladepunkt mit Ladehaube und Depotbox vorzusehen.

Für Lade- und Testzwecke sind in der Werkstatt zwei mobile Ladegeräte mit einer Ladeleistung von 40 kW einzuplanen.

6 Analysen zur Energiebereitstellung

6.1 Untersuchung Netzanbindung

Auf Basis der durchgeführten Umlaufplanung wird für den Betriebshof sowie für die als Ladestandorte ausgewählten Endpunkte die erforderliche Anschlussleistung ermittelt. Es wird das Zusammenspiel der Ladeinfrastruktur mit dem speisenden Stromnetz untersucht.

Zur Ladung der Batteriebusse auf dem Betriebshof beträgt der Leistungsbedarf auf dem Betriebshof beim BEB/GL-Betrieb ca. 4 MW und beim BEB/DL-Betrieb ca. 6 MW. Die Differenz beruht auf der Energiemenge, die auf dem Betriebshof nachzuladen. Der BEB/DL deckt seinen gesamten Energiebedarf auf dem Betriebshof. Wobei der BEB/GL seinen Energiebedarf auch über die Ladeinfrastruktur auf der Strecke deckt.

Durch den Netzbetreiber ist die erforderliche Leistung bereitzustellen. Aus ersten Gesprächen mit dem Netzbetreiber ist zu schließen, dass ein Netzausbau zur Lieferung der notwendigen Leistung im Endausbau notwendig ist. In der ersten Umsetzungsstufe kann die notwendige Leistung aus dem bestehenden Netz bezogen werden. Dieser Anschluss kann in späteren Ausbaustufen als Redundanz dienen.

Der Anschluss ist aufgrund der hohen benötigten Leistung über das Mittelspannungsnetz herzustellen. Dafür ist zwischen dem Versorgungsnetz des Netzbetreibers und des eigenen Netzes eine Übergabestation einzurichten.

Für die Ladestandorte an den Endpunkten orientiert sich der Leistungsbedarf an der Ladeleistung und der Anzahl der Ladepunkte. Je Ladepunkt wird eine Ladeleistung von 300 kW benötigt. In der Leistungsbedarfsbestimmung je Ladestandort sind Wirkungsgradverluste und Leistungsfaktoren einzubeziehen.

6.2 Konzeption elektrische Grundversorgung Betriebshof

Ab dem Übergabepunkt des Netzbetreibers wird die elektrische Grundversorgung für den gesamten Busbetriebshof konzeptioniert. Dies umfasst die Verteilungsplanung der Trafostationen und die Konzeptionierung der Mittelspannungsversorgung für die Versorgung der Ladeinfrastruktur sowie bei Bedarf für die Betriebswerkstatt. Die Anbindung an bestehende Verteilungen wird dabei berücksichtigt. Auf dieser Basis werden zudem Art und Menge der erforderlichen Versorgungseinrichtungen (Übergabestation, Trafostation) ermittelt.

Für die Versorgung der Ladeinfrastruktur werden acht Transformatoren benötigt. Diese sind mittelspannungsseitig an die Übergabestation anzuschließen. Die Netzform kann als Stich- oder Ringnetz ausgeführt werden. Ein Ring bietet den Vorteil, dass bei Störung auf einer Kabelstrecke eine zweite Kabelstrecke für die Versorgung der Transformatoren zur

Verfügung steht. Es werden jedoch mehrere, kostenintensive Mittespannungsschaltanlagen benötigt. Die Anbindung der einzelnen Transformatoren in Stichen ist technisch einfacher zu lösen, bietet jedoch weniger Redundanz.

Da die vorgesehenen Standorte der Trafo-Ladetechnik-Stationen in unmittelbarer Nähe zu der Übergabestation liegen, wird die Anbindung der Transformatoren über Stiche empfohlen. Der Störfall auf der Kabelstrecke, den ein Ring ausgleichen könnte, wird bei der sehr kurzen Entfernung als sehr unwahrscheinlich eingeschätzt.

6.3 Nutzung erneuerbarer Energien

6.3.1 Blockheizkraftwerk

Ein Blockheizkraftwerk (BHKW) arbeitet nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung. In einem Verbrennungsmotor oder einer Gasturbine wird mithilfe eines Kraftstoffes (beispielsweise Erdgas oder Heizöl) mechanische Energie hergestellt. Diese wird über eine Kupplung auf einen Generator übertragen, der daraus elektrische Energie wandelt. Die beim Verbrennungsprozess entstehende Wärme wird über die Motorkühlung und einen Kühlwasserwärmeübertrager sowie über einen Abgaswärmeübertrager einem Wärmekreislauf zugeführt. So kann die Wärme über ein Wärmenetz zum Heizen oder der Warmwasserzubereitung nutzbar gemacht werden. Die Nutzbarmachung von elektrischer wie thermischer Energie ist integraler Bestandteil der Funktionsweise des BHKW.

Der Betrieb eines BHKW kann über verschiedene Kraft- oder Brennstoffe erfolgen. Dazu zählen die fossilen Energieträger wie Heizöl/Diesel, Erdgas, Flüssiggas und regenerative Energieträger wie Biogas, Pflanzenöl oder Holz. Der Bezug von Biogas kann entweder über den Bezug aus dem Erdgasnetz erfolgen, indem an einer anderen Stelle im Erdgasnetz Biogas durch Aufbereitungsanlagen methanisiert und eingespeist wird. Eine weitere Möglichkeit zum Bezug von Biogas besteht aus der Erzeugung vor Ort mithilfe einer Biogasanlage. Im Vergleich zu fossilen Energieträgern, trägt der Einsatz von regenerativen Energieträgern zur langfristigen Reduzierung der Treibhausgasbilanzierung bei.

Die Errichtung eines betriebshofeigenen BHKW bedeutet eine Entkopplung vom Energiemarkt. Aufgrund der zum Betrieb des BHKW benötigten Kraftstoffe entsteht eine Abhängigkeit von diesen Energieträgern. Der Betrieb eines BHKW ist nur effizient, sofern neben elektrischer Energie auch thermische Energie verwendet wird.

Bei einer Betriebshoffläche von ca. 40.000 m² und den betriebsbedingten Flächenbedarfen des Busbetriebs ist die Verwendung eines flächenmäßig kleinen oder modularen BHKW zu verfolgen. Der Anlagenbetrieb fußt generell auf der Nutzung von erneuerbaren Energieträgern, wie bspw. Biomasse & -gase. In der Gesamtbetrachtung ist die Biomasseerzeugung in Konkurrenz zu Landnutzungen wie Forst- und Landwirtschaft zu bewerten. Zudem ist der Transportbedarf in die Bewertung einzubeziehen und abzuwägen.

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Analysen zur Energiebereitstellung

Das BHKW ist auf den Betrieb der Spitzenlast auszulegen. In den nicht benötigten Zeiten ergeben sich geringere Betriebsstunden, was sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

6.3.2 Photovoltaik

In einer Photovoltaikanlage absorbieren Solarzellen das Sonnenlicht und wandeln dieses in Gleichstrom um. Ein Wechselrichter wandelt den Gleichstrom in Wechselstrom um. Standort und Ausrichtung der PV-Anlage ist entscheidend für die Höhe des Energieertrags. Der erzeugte Strom kann entweder in ein angebundenes Netz oder in einen Batteriespeicher eingespeist werden.

Zur Installation von PV-Anlagen auf dem Betriebshof eignen sich generell Flachdächer sowie Pultdächer mit Süd-, West- oder Ostausrichtung. Die Größe der zur Verfügung stehenden Dachfläche ist entscheidend für die erzeugbare Leistung und Energie. Die Statik der Dächer muss die zusätzlichen Dachlasten ermöglichen. Es wird angenommen, dass die Dachfläche der Abstellung zur Aufnahme der PV-Anlage genutzt wird. Durch die technisch-physikalisch bedingt begrenzte Leistungsfähigkeit der Solarmodule, kann bestenfalls (im Sommer) lediglich ein Zehntel der benötigten Energie durch die PV-Anlage bereitgestellt werden. Die geringe Energiemenge, die am Tag erzeugt wird, sollte direkt durch tagsüber ladende Busse genutzt werden. Der Einsatz eines kostenintensiven Zwischenspeichers, der die am Tag gewonnene Energie für die Nachtladung zu nutzen, wird daher als nicht dienlich eingeschätzt. Nicht für die Ladung genutzte Energie kann für den weiteren Eigenbedarf auf dem Betriebshof genutzt werden.

In direkter Umgebung von Remscheid wurden keine Photovoltaik-Freiflächenanlagen identifiziert. Daher wird diese Möglichkeit der Nutzung von Solarenergie ausgeschlossen.

6.3.3 Windenergie

Der Rotor der Windenergieanlage formt die Bewegungsenergie des Windes zunächst in mechanische Rotationsenergie um. Ein Generator wandelt diese anschließend in elektrische Energie um. Vor allem hohe Windgeschwindigkeiten, die insbesondere auf freien Flächen sowie in Bergen und auf dem Meer erreicht werden, sind entscheidend für einen hohen Stromertrag.

Mit der Änderung des Gesetzes zur Ausführung des Baugesetzesbuch wurde ein 1.000 m-Mindestabstand von Windenergieanlagen durch den Landestag NRW beschlossen. Somit müssen Windenergieanlagen in NRW einen Mindestabstand von 1.000 m zu Gebieten mit Bebauungsplänen (§ 30 BauGB) sowie im Zusammenhang bebauten Ortsteilen (§ 34 Abs. 6 BauGB) einhalten. Diese Änderung ist seit dem 15.07.2021 in Kraft.

Durch die urbane Agglomeration von Remscheid und der topografisch bedingten Siedlungsanordnung ist die Errichtung von Windkraftanlagen im näheren Umfeld des

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Analysen zur Energiebereitstellung

Betriebshofes nicht möglich. Allgemein ist eine Errichtung von Windkraftanlagen im baulichen Bezug zu dem Nutzungstyp „Betriebshof“ baurechtlich nicht gegeben. Gemäß Abschlussbericht „Flächenanalyse Windenergie“ des Landesamts für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) steht für das Stadtgebiet Remscheid keine Potenzialfläche zur Verfügung.

Im näheren städtischen Umfeld von Remscheid befinden sich keine Windkraftanlagen. Die nächsten Windkraftanlagen stehen nach Energieatlas des Landes NRW in 6-10 km Entfernung, u. a. in der Nähe von Wuppertal, Cronenberg oder Hückenvagen. Unter der Prämisse der direkten Nutzung der aus diesen Anlagen erzeugten Energie ist die Entfernung zu groß.

7 Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten

7.1 Potential von Last- und Lademanagement

Um die Netzlast des Busbetriebshofs während der parallelen Nachladung einer Flotte zu minimieren, können über ein Last- und Lademanagement die Ladezyklen reguliert und über den kompletten verfügbaren Ladezeitraum verteilt werden.

Es werden die Potentiale, die aus dem Einsatz eines Last- und Lademanagements generiert werden können, aufgezeigt. Neben einer gleichmäßigen Ladung liegt der Fokus auf der gesteuerten Ladung, welche das gezielte Verschieben von Ladevorgängen vorsieht.

Ein gesteuertes Last- und Lademanagementsystem (LMS) kann eine wichtige Voraussetzung für das gleichzeitige Laden mehrerer Elektrofahrzeuge – unabhängig davon, ob Pkw, Bus oder Lkw – sein. Das LMS regelt zusammenhängende Ladestationen im Verbund und sorgt für eine optimierte Verteilung der Ladeleistung auf alle zu ladenden Fahrzeuge. Die Leistungsverteilung kann aus verschiedenen Gründen notwendig und vorteilhaft sein. Notwendig ist es, um beim Laden mehrerer Fahrzeuge einen als maximale Netzanschlussleistung definierten Wert nicht zu überschreiten. Ein LMS verteilt diese auf die angeschlossenen Fahrzeuge. Dies kann statisch oder dynamisch erfolgen. Beim statischen LMS wird die Ladeleistung gleichmäßig auf alle Ladepunkte verteilt, egal ob die angeschlossenen Fahrzeuge geladen werden oder nicht. Im Fall der dynamischen Variante richtet sich die Verteilung nach der Anschlusskapazität, welche bei Bedarf ausgeschöpft wird. Berücksichtigt werden aber auch andere Verbraucher.

Vorteil und Ziel des LMS ist damit auch eine gleichmäßige Verteilung der Ladezeiten über den Tag und einen damit verbundenen konstanten Bezug geringerer Ladeleistungen aus dem Netz. Dies führt zu einer Vermeidung von Lastspitzen sowie der Möglichkeit, den Netzanschluss für das Laden geringer auszulegen und damit Kosten zu verringern. Für das Laden von Bussen kann ein dynamisches LMS um eine fahrplanbasierte Variante erweitert werden. Dabei wird die verfügbare Ladeleistung nicht nur in Abhängigkeit der Anschlusskapazität verteilt. Hinzu kommen bei der Steuerung der Ladevorgänge neben dem Energiebedarf auch die Fahr- und Einsatzzeiten der Busse.

Je größer die Fahrzeugflotte umso komplexer werden die Ladevorgänge. Vor diesem Hintergrund wird es als effektiv eingeschätzt ab einer mittleren Batteriebusflotte, ein LMS zur Überwachung und Steuerung der Ladevorgänge und Gesamtlast einzusetzen.

Beim GL sind die Ladepunkte auf der Strecke in das LMS aufzunehmen, um diese zentral überwachen zu können. Ein Lastmanagement für die Ladeinfrastruktur Strecke ist nicht

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten

notwendig, da für den Betrieb die notwendigen Ladeleistungen nicht eingeschränkt werden sollten.

7.2 Weitere Maßnahmen zur Effizienzsteigerung

Qualitativ werden jene Themenbereiche betrachtet, die zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems führen können. Der Fokus liegt auf der Ermittlung von Potentialen in der Gesamtkette von Netzanschluss bis Ladeschnittstelle. Im Ergebnis werden gezielt Maßnahmen aufgezeigt, welche die bereits hohe Umweltverträglichkeit des Batteriebus-systems weiter steigern können.

(2nd-Life-) Energiespeicher

Der Einsatz von Energiespeichern als mögliches Bindeglied zwischen Energieversorger und Abnehmer beim Laden von Elektrobussen kann Leistungsspitzen beim Ladevorgang abpuffern. Die Energiespeicher können zu Schwachlastzeiten des Stromnetzes geladen werden, um mit dieser Energie zu Spitzenlastzeiten Busse zu laden. Dadurch wird eine gleichmäßigere Auslastung des Stromnetzes ermöglicht. Gleichzeitig kann durch das Speichern elektrischer Energie für eine gesteigerte Versorgungssicherheit beim Laden von Elektrobussen gesorgt werden.

Als Energiespeicher können beispielsweise 2nd-Life-Batterien zum Einsatz kommen. Dabei handelt es sich um gebrauchte Hochvoltspeicher aus Elektrofahrzeugen, welche für ihren Einsatz in Traktionsanwendungen über keine ausreichende Kapazität mehr verfügen, für andere Nutzungszwecke aber immer noch eine ausreichende Leistungsfähigkeit besitzen. Dies hat den Nebeneffekt des nachhaltigen Umgangs mit Fahrzeugbatterien, denn die Nutzungsdauer wird verlängert und dadurch der „Fußabdruck“ der Batterie verkleinert.

Es gibt bereits verschiedene Projekte, bei denen solche Second-Life-Energiespeicher zum Einsatz kommen. Dazu zählt ein Gemeinschaftsprojekt von der Verkehrsbetriebe Hamburg-Holstein GmbH (VHH) und MAN Truck & Bus. Dabei werden Batterien aus Elektrobussen von MAN zu einem Energiespeicher zusammengefasst, welcher zur Ladung von Elektrobussen auf dem Betriebshof genutzt wird. Ein weiteres Projekt betreiben die Kölner Verkehrsbetriebe (KVB). Dabei werden Hochvoltspeicher aus Elektrofahrzeugen von Ford genutzt, die noch über eine Kapazität von maximal 80 % (bezogen auf den initialen Zustand) verfügen. Von diesen Akkus wurden 500 Stück zu einem Energiespeicher mit einem Gesamtenergieinhalt von 300 Kilowattstunden zusammengefasst. Die Besonderheit des Projektes ist, dass der Energiespeicher mit Bremsenergie aus dem Straßenbahnnetz gespeist wird. Seinen Standort hat er an der Stadtbahn-Endhaltestelle Bocklemünd, wo ihn Elektrolinienbusse der KVB sowie parkende PKW zum Nachladen nutzen.

Die Second-Life-Energiespeicher-Systeme sind aktuell nur in kleinerem Maßstab und als Testprojekte in Verwendung.

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Maßnahmen zur Effizienzsteigerung des Gesamtsystems oder zur Einbindung lokaler Erzeugungskapazitäten

Synergieeffekte zur Effizienzsteigerung

Die Nutzung von Synergieeffekten kann ein Baustein zur Effizienzsteigerung des Gesamtennergiesystems in (Verkehrs-)Unternehmen sein. Potenziale bestehen dabei in der Einsparung von Energie sowie der Senkung der Energie- und Betriebskosten und der damit verbesserten Wirtschaftlichkeit. Synergieeffekte können in verschiedenen Bereichen des Systems erreicht werden. Synergien können bspw. in der Nutzung von Abwärmequellen für weitere Prozesse entstehen. Überschüssige Abwärme kann u. a. zur Raumwärme- und Warmwassererzeugung – auch in Kombination mit Wärmepumpen – weiterverwendet werden. Genauso kann sie der Stromerzeugung mittels Dampfprozessen oder ähnlichen Anlagen sowie der Kälteerzeugung durch Kältemaschinen dienen. Damit lässt sich neben der Erwärmung von Hallen oder Werkstätten im Winter auch deren Klimatisierung in den Sommermonaten realisieren. Grundsätzlich sollte eine effiziente Steuerung und Dimensionierung von Abwärme produzierenden Maschinen Verluste minimieren.

8 Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

8.1 Investitionskosten und Gesamtkosten

Auf Grundlage der Eingangsdaten, der Energiebilanzierung, der Fahrzeugkonfiguration und der Auslegung der Ladeinfrastruktur erfolgt eine ökonomische Bewertung des BEB/DL und BEB/GL.

Hierzu werden zuerst die Investitions- und Betriebskosten, die bei der Einführung des BEB/DL und BEB/GL entstehen ermittelt. Dabei werden die jeweiligen Stückkosten von Fahrzeugen und Infrastrukturelementen betrachtet. Danach erfolgt eine Gesamtkostenanalyse unter Einbeziehung aller relevanten Parameter. Dazu wird eine Betrachtung des festgelegten Nutzungszeitraums durchgeführt, woraus sich eine jährliche Aufstellung aller Investitions- und Betriebskosten ergibt.

In der Kostenbetrachtung wird eine angestrebte Förderung der Elektrobusbeschaffung berücksichtigt. Zudem wird dem Elektrobuseinsatz der herkömmliche Dieselseinsatz gegenübergestellt.

Die Kostenermittlung erfolgt anhand von Kennzahlen aus bereits realisierten Projekten, aus vorliegenden Kostenschätzungen Dritter und unter Nutzung von Kennwerten des Baukostenindex.

8.1.1 Datengrundlage

Im Zuge der Datenerfassung wurden neben den Daten für die technisch-betriebliche Untersuchung auch eine Reihe von wirtschaftlichen Basisdaten aufgenommen, die als Parameter in die wirtschaftlichen Untersuchungen eingehen. Außerdem gehen die Laufleistungen, Einsatzzeiten, Energieverbräuche, Fahrzeug- und Infrastrukturauslegungen in die Berechnung ein.

Die Kostenbetrachtung wird auf Basis der Kapitalwertmethode durchgeführt. Bei sämtlichen in der Kostenanalyse aufgeführten Kosten handelt es sich um Netto-Angaben.

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Investitionskosten

Es fließen sämtliche Investitionskosten unter Berücksichtigung der exakten Systemauslegung in die Betrachtung ein. Als Investitionskosten sind folgende Kostengruppen mit ihren einzelnen Bestandteilen zu unterscheiden:

- 1) Fahrzeugkosten
 - Grundfahrzeug
 - Energiespeicher (Batterie)
- 2) Kosten für Ladeinfrastruktur
 - Ladeinfrastruktur Betriebshof
 - Ladeinfrastruktur Strecke
- 3) Sonstige Kosten
 - Werkstatt
 - Personal
 - Sonstige Projektkosten

1) Fahrzeugkosten

In den Fahrzeugkosten werden die Kosten für das Grundfahrzeug, d. h. ohne antriebskonzeptspezifische Kosten ausgewiesen. Zusätzlich werden Kosten für den Energiespeicher, die maßgeblich durch die jeweils gewählte Speichergröße bestimmt werden, aufgeführt. Darüber hinaus werden Kosten für weitere systembedingte Komponenten, wie der elektrischen Traktionsausrüstung, Nebenaggregaten und entsprechender fahrzeugseitiger Ladeinfrastruktur separat aufgezeigt.

2) Kosten für Ladeinfrastruktur

In den Kosten für die Ladeinfrastruktur werden die Kosten für die Ladeinfrastruktur an den Endpunkten auf der Strecke, Kosten für die Energieversorgung sowie Ladeinfrastruktur im Betriebshof zum Nachladen erfasst. Diese umfasst neben den eigentlichen Ladegeräten sowie den Ladehauben auch die notwendigen Komponenten der Elektroenergieversorgung sowie den Anschluss an das Mittelspannungsnetz.

Zudem werden die Leitungswegekosten, die aus den Kosten für den Ausbaubedarf auf dem Betriebshof und pauschalierten Beträgen für den Bau der Ladestationen gebildet werden, berücksichtigt.

3) Sonstige Kosten

Zusätzlich werden die Personalaufwendungen für die Qualifizierung von Mitarbeitern in Fahrdienst und Werkstatt, für die Arbeit an und mit Elektrobussen sowie Personalkosten für das Projektmanagement als Einmalkosten einbezogen. In den sonstigen Projektkosten werden Planungskosten und zu zahlende Baukostenzuschüsse zusammengefasst.

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Betriebskosten

In der Gesamtkostenbetrachtung sind neben den Investitionskosten auch sämtliche Betriebskosten enthalten. Die berücksichtigten Betriebskosten umfassen:

- Kraftstoff- bzw. Energiekosten
- AdBlue
- Wartung und Instandhaltung
- Fahrpersonal

Die Verbräuche und Kosten für Dieseldieselkraftstoff basieren auf Angaben der SR. Die Kosten für elektrische Energie wurden anhand der ermittelten Energiemengen ermittelt. Die für das Fahrpersonal angesetzten Kosten basieren ebenfalls auf Angaben der SR. Für die Entwicklung sämtlicher Betriebskostenpositionen sind Kostenprognosen einschlägiger Quellen hinterlegt, zudem gehen Schätzungen der VCDB sowie Angaben der SR in die Berechnung ein. Im Betrachtungszeitraum auftretende jährliche Preisänderungen durch Inflation i. H. v. 2 % werden in der Kostenbetrachtung berücksichtigt.

Gesamtkosten

In der Gesamtkostenberechnung werden die Investitions- und Betriebskosten über den gewählten Betrachtungszeitraum zusammengeführt. Die Ausweisung der Gesamtkosten erfolgt dabei jährlich. Daher sind elementar folgende Eingangsgrößen heranzuziehen:

- Laufleistungsparameter
 - Jahreskilometerleistung (pro Fahrzeug und Jahr)
 - Jahresbetriebsdauer (pro Fahrzeug und Jahr)
- Verbrauchswerte pro Kilometer
 - Dieselfahrzeug (Diesel, AdBlue)
 - Elektrofahrzeug (elektrische Energie)

Dabei sind in der Jahreskilometerleistung sowohl die Einsatz- als auch die Leerkilometer enthalten. In der Jahresbetriebsdauer sind ausschließlich die Fahrzeiten und keine Wendezeiten berücksichtigt. In den Verbrauchswerten sind die jahreszeitlichen Schwankungen der Energiebedarfe berücksichtigt, indem die Anzahl der Monate, in denen der Fahrzeuginnenraum temperiert wird, einbezogen wird.

Die Einsatz- und Abschreibungsdauern für die Diesel- und Elektrobusse wurden von SR mit 16 Jahren Einsatzdauer und 12 Jahren Abschreibungsdauer vorgegeben. Dabei wird angenommen, dass nach 8 Jahren ein Austausch des Energiespeichers der Batteriebusse erfolgt. Für die Abschreibungszeit der Energiespeicher wird ebenfalls 8 Jahre angesetzt. Die Kosten für den Kapitaldienst werden mit 6 % angesetzt. Der Betrachtungszeitraum wird auf 16 Jahre festgelegt.

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Fördermöglichkeiten

Im Rahmen der Förderrecherche erfolgte eine detaillierte Betrachtung aller Förderprogramme auf EU-, Bundes-, Landes- und Kommunalebene, welche das Thema Elektromobilität im Allgemeinen und Elektrobusse im Konkreten adressieren.

Es wurden die Anforderungen der Projektdurchführung den förderpolitischen Kriterien und Anforderungen – Fördergegenstand, Förderhöhe, Zuwendungsberechtigte, Zuwendungsvoraussetzungen sowie Antragsverfahren und Fristen – der untersuchten Förderprogramme gegenübergestellt und die Bedeutung für die Projektdurchführung beurteilt.

Für den konkret zu prüfenden Fördergegenstand der Stadtwerke Remscheid werden zunächst das Gesetz über den öffentlichen Personennahverkehr in Nordrhein-Westfalen (nach §13 Absatz 1 Nr. 6 ÖPNVG NRW) des Ministeriums für Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (VM NRW) sowie die technologieoffene Förderrichtlinie für Busse mit alternativen Antrieben im Personenverkehr (2021–2023/24) des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMDV) herangezogen.

Im Ergebnis der Förderrecherche wurde das Förderprogramm des Landes Nordrhein-Westfalen zur „Förderung von Elektrobussen nach § 13 ÖPNVG NRW“ als geeignetes Förderinstrument identifiziert.

Die Kostenbetrachtung erfolgt unter Maßgabe folgender Förderquoten:

- für Fahrzeuginvestitionskosten 60 % des die Kosten eines vergleichbaren Dieselsebusses übersteigenden Betrages
- 90 % der zuwendungsfähigen Kosten zur Errichtung der notwendigen Energieversorgungsinfrastruktur und zur Beschaffung erforderlicher spezifischer Werkstatteinrichtungen

8.1.2 Ermittelte Investitionskosten

BEB DL

Bei Gesamtumstellung der Busflotte auf BEB DL beträgt der Investitionskostenbedarf ca. 73 Mio. €. Mit einer Förderung (60 % systembedingte Mehrkosten Fahrzeug, 90 % Energieversorgungsinfrastruktur, Werkstatteinrichtung) reduziert sich der Investitionsbedarf auf ca. 43 Mio. €.

In Tabelle 8.5 sind die Investitionskosten nach Kostengruppen aufgeführt.

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Kostenposition	Anzahl	ohne Förderung	mit Förderung
Fahrzeug	89 Stück	66.411.375 €	41.033.550 €
davon Solobus	64 Stück	43.872.000 €	27.148.800 €
davon Gelenkbus	25 Stück	22.539.375 €	13.884.750 €
Ladeinfrastruktur		5.008.914 €	500.891 €
Sonstiges		1.516.191 €	1.042.868 €
Gesamt		72.936.481 €	42.577.309 €

Tabelle 5: Investitionskosten Flotte BEB DL

BEB GL

Bei Gesamtumstellung der Busflotte auf BEB GL beträgt der Investitionskostenbedarf ca. 70 Mio. €. Mit einer Förderung (60 % systembedingte Mehrkosten Fahrzeug, 90 % Energieversorgungsinfrastruktur, Werkstatteinrichtung) reduziert sich der Investitionsbedarf auf ca. 40 Mio. €.

In Tabelle 6 sind die Investitionskosten nach Kostengruppen aufgeführt.

Kostenposition	Anzahl	ohne Förderung	mit Förderung
Fahrzeug	87 Stück	60.681.000 €	38.351.880 €
davon Solobus	64 Stück	41.108.000 €	26.043.200 €
davon Gelenkbus	23 Stück	19.573.000 €	12.308.680 €
Ladeinfrastruktur		7.248.855 €	724.886 €
Sonstiges		1.690.167 €	1.216.844 €
Gesamt		69.620.023 €	40.293.609 €

Tabelle 6: Investitionskosten Flotte BEB GL

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

8.1.3 Ermittelte Gesamtkosten

Dieselbus, BEB DL, BEB GL, ohne Förderung

Kostenposition	Diesel	BEB DL	BEB GL
Kosten Bereitstellung Fahrzeug	66.088.985 €	115.136.451 €	105.012.572 €
Kosten Bereitstellung Infrastruktur	947.762 €	6.370.424 €	8.984.035 €
Betriebskosten Strecke	145.795.592 €	138.424.416 €	137.476.840 €
Sonstiges		990.276 €	1.164.252 €
Kapitalverzinsung	8.357.688 €	27.124.337 €	25.439.063 €
Gesamt	221.190.027 €	288.045.904 €	278.076.762 €

Tabelle 7: Gesamtkosten Flotte Dieselbus, BEB DL, BEB GL, ohne Förderung

Dieselbus, BEB DL, BEB GL, mit Förderung

Kostenposition	Diesel	BEB DL	BEB GL
Kosten Bereitstellung Fahrzeug	66.088.985 €	89.758.626 €	82.683.452 €
Kosten Bereitstellung Infrastruktur	947.762 €	1.389.077 €	1.986.741 €
Betriebskosten Strecke	145.795.592 €	138.424.416 €	137.476.840 €
Sonstiges		990.276 €	1.164.252 €
Kapitalverzinsung	8.357.688 €	18.602.135 €	17.010.783 €
Gesamt	221.190.027 €	249.164.530 €	240.322.069 €

Tabelle 8: Gesamtkosten Flotte Dieselbus, BEB DL, BEB GL, mit Förderung

8.2 Umweltparameter und Umweltkosten

8.2.1 Grundlage

Ein zentrales Motiv für Untersuchungen zur Umstellung von fossil betriebenen Bussystemen auf Elektrobussysteme sind die ökologischen Effekte. Auf Grundlage der Eingangsdaten, der Energiebilanzierung, der Fahrzeugkonfiguration und der Auslegung der Ladeinfrastruktur erfolgt eine ökologische Bewertung des BEB/DL und BEB/GL.

Es wird der bei Flottenumstellung ökologische Nutzen ausgewiesen. Es werden die Umweltparameter, wie der Ausstoß von Treibhausgasen und lokalen Luftschadstoffen, berechnet und monetarisiert. Die Emissionsbilanzierung erfolgt laufleistungsbezogen als Vergleichsdarstellung zwischen dem Dieselbus auf der einen sowie dem BEB/DL und BEB/GL auf der anderen Seite.

Um die energetische Effizienz bewerten zu können, ist es erforderlich, die gesamte Wirkungsgradkette eines Antriebssystems zu betrachten. Diese sogenannte Well-to-Wheel-Betrachtung umfasst neben den Energieverlusten während des Betriebs (Tank-to-Wheel) auch die Erzeugung, Übertragung, Zwischenspeicherung und Ladung des Energieträgers (Well-to-Tank).

Die ökologische Bewertung liefert eine laufleistungsbezogene CO₂-Bilanzierung als Vergleichsdarstellung zwischen der Dieselbusflotte und der Elektrobussflotte, mit Stromkennzeichnung der EWR*-Natur-Produkte.

Der Energieverbrauch und die Menge an CO₂-Äquivalent werden auf Grundlage der DIN EN 16258 (2013) sowie die Kosten der CO₂-Äquivalent-Ausstöße nach Standardisierter Bewertung ermittelt. Die Energieketten des Referenzbusses und des Elektrobusses werden für die ausgewählten Umläufe auf Grundlage der ermittelten Energiewerte verglichen.

Für den Referenzbus werden zusätzlich die lokalen Schadstoffemissionen von Stickoxiden NO_x, Feinstaub (PM), Kohlenmonoxid CO und Kohlenwasserstoffen HC mengenmäßig ermittelt und dargestellt.

Abschließend erfolgt die Monetarisierung der Emissionen auf Basis der Verfahrensanleitung zur Standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs und die Berechnung der Treibhausgas-Vermeidungskosten aus der Differenz von Technologiezusatzkosten und eingesparten Energiekosten im Verhältnis zur erzielten Reduktion des Ausstoßes von CO₂-Äquivalenten (EUR/t CO₂-e).

Die Treibhausgasvermeidungskosten zeigen, zu welchen Kosten die Treibhausgasemissionen um 1 Tonne CO₂-e verringert werden können (€/Tonne CO₂-e). Damit wird ein Vergleich der Kosteneffizienz zur Emissionsminderung zwischen Maßnahmen im Verkehr, aber auch z. B. mit Maßnahmen aus anderen Bereichen möglich. Die spezifischen

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

Treibhausgasvermeidungskosten fahrzeugbezogener Maßnahmen berechnen sich als Quotient aus der Änderung der Fahrzeugkosten und den insgesamt erreichbaren Treibhausgas-minderungen über einen festgelegten Zeitraum.

Zur Berechnung der spezifischen Treibhausgasvermeidungskosten (€/Tonne CO₂-e) werden zum einen die pro Fahrzeug erreichbaren Treibhausgas-minderungen entsprechend der spezifischen Minderungspotenziale berechnet (CO₂-e "Well-to-Wheel" mit Faktoren gemäß DIN EN 16258). Zum anderen werden die aus Zusatzkosten und Kraftstoffeinsparungen insgesamt resultierenden Änderungen der Fahrzeugkosten ermittelt. Anschließend werden die Differenzkosten durch die Treibhausgas-minderung dividiert.

8.2.2 Ermittelte Emissionen von CO₂-Äquivalenten

BEB DL

In Tabelle 9 sind der Energieverbrauch und die CO₂-Äquivalent-Emissionen des BEB DL, vergleichend zum Dieselbus, aufgeführt.

	Einheit	BEB DL	Einsparung
Energieverbrauch Dieselbus	MJ	74.540.059	
Energieverbrauch Elektrobus	MJ	57.303.950	
Energieersparnis Elektrobus ggü. Dieselbus	MJ	-17.236.109	-23 %
CO ₂ -Äquivalent Dieselbus	kg	5.603.597	
CO ₂ -Äquivalent Elektrobus	kg	247.658	
Ersparnis CO₂-Äquivalent Elektrobus ggü. Dieselbus	kg	-5.355.938	-96 %
CO ₂ -Äquivalent Dieselbus	€	1.448.189	
CO ₂ -Äquivalent Elektrobus	€	64.068	
Ersparnis CO₂-Äquivalent Elektrobus ggü. Dieselbus	€	-1.384.121	-96 %

Tabelle 9: Energieverbrauch und Bilanz der CO₂-Äquivalente, Flotte Dieselbus, BEB DL, Well-to-Wheel-Betrachtung, ein Jahr

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

BEB GL

In Tabelle 10 sind der Energieverbrauch und die CO₂-Äquivalent-Emissionen des BEB GL, vergleichend zum Dieselbus, aufgeführt.

	Einheit	BEB GL	Einsparung
Energieverbrauch Dieselbus	MJ	74.540.059	
Energieverbrauch Elektrobus	MJ	56.810.405	
Energieersparnis Elektrobus ggü. Dieselbus	MJ	-17.729.654	-24 %
CO ₂ -Äquivalent Dieselbus	kg	5.603.597	
CO ₂ -Äquivalent Elektrobus	kg	245.525	
Ersparnis CO₂-Äquivalent Elektrobus ggü. Dieselbus	kg	-5.358.072	-96 %
CO ₂ -Äquivalent Dieselbus	€	1.448.189	
CO ₂ -Äquivalent Elektrobus	€	63.534	
Ersparnis CO₂-Äquivalent Elektrobus ggü. Dieselbus	€	-1.384.655	-96 %

Tabelle 10: Energieverbrauch und Bilanz der CO₂-Äquivalente, Flotte Dieselbus, BEB GL, Well-to-Wheel-Betrachtung, ein Jahr

8.2.3 Lokale Schadstoffemissionen

Die lokalen Schadstoffemissionen CO, HC, NO_x und PM treten beim BEB/DL und BEB/GL identisch auf. In Tabelle 11 sind die beim Elektrobus gegenüber dem Dieselbus erzielten Schadstoffemissionseinsparungen aufgezeigt.

	Einheit	BEB
Ersparnis CO	kg	-2.104
Ersparnis HC	kg	-228

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Betriebswirtschaftliche und umweltbilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der Umstellung auf alternative Antriebe

	Einheit	BEB
Ersparnis NO _x	kg	-10.902
Ersparnis PM	kg	-72

Tabelle 11: Einsparpotential lokaler Schadstoffemissionen, Flotte Dieselbus ggü. Batteriebus, Well-to-Wheel-Betrachtung, ein Jahr

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Gegenüberstellung BEB/DL und BEB/GL

Im Ergebnis der vergleichenden Gegenüberstellung des Einsatzes von BEB mit ausschließlicher Ladung im Depot (BEB/DL) und von BEB mit Ladung im Betriebshof sowie an geeigneten Endpunkten im Liniennetz (BEB/GL) wird der BEB/GL favorisiert.

Die Beschaffungsstrategie sieht eine Umstellung der Gesamtflotte auf BEB/GL bis zum Jahr 2037 vor. Die Beschaffung der Fahrzeuge, der Aufbau der Ladeinfrastruktur im Betriebshof und an den sieben Endpunkten sowie die Anpassung der Werkstatt auf Elektrobusbetrieb soll in zu definierenden Umsetzungs- und Ausbaustufen erfolgen. Maßgebend sind hierbei die Neu-/Wiederbeschaffungszyklen für Fahrzeuge sowie die Beschaffungsquoten aus der Clean Vehicles Directive.

9.2 Die fünf Projektstufen

Die Umstellung auf emissionsfreie Antriebe bei der SR soll schrittweise erfolgen. Es ist ein Umstellungsplan zu entwickeln, der neben betrieblichen Aspekten, wie Neu-/Wiederbeschaffungszyklen für Fahrzeuge, ebenfalls gesetzliche Vorgaben, wie Beschaffungsquoten der Clean Vehicles Directive, berücksichtigt. Es ist ein Betriebskonzept für den Elektrobusseinsatz festzulegen, welches das gewählte Fahrzeugkonzept und Ladekonzept sowie erforderliche betriebliche Anpassungen beinhaltet.

Die Umstellung der Busflotte auf Elektrobusbetrieb ist durch einen tiefgreifenden Systemwechsel gekennzeichnet. Insbesondere das erforderliche Zusammenspiel von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur erfordert eine umfassende Koordination aller projektrelevanten Prozesse und Leistungen. Ein frühzeitiges Einbinden aller am Projekt Beteiligten fördert dabei eine weitgehende reibungslose Projektumsetzung.

In zeitlicher Hinsicht definieren generell folgende fünf Projektstufen den Projektablauf: 1. Projektvorbereitung, 2. Planung, 3. Ausführungsvorbereitung, 4. Ausführung, 5. Projektabschluss.

Die wesentlichen Anforderungen und Meilensteine der einzelnen Projektstufen sind als Gesamtüberblick in Abbildung 1 aufgeführt. Eine Orientierung für den Projektablauf sollen die folgenden Ausführungen geben.

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Zusammenfassung und Ausblick



Abbildung 8: Die fünf Projektstufen

1. Projektvorbereitung: Mit Vorliegen der Machbarkeitsstudie wurden die Fahrzeugkonzepte BEB/DL und BEB/GL bezüglich technisch-betrieblicher, wirtschaftlicher und ökologischer Aspekte analysiert und hinsichtlich des Einsatzes bei der SR bewertet. Auf Grundlage der Ergebnisse aus der Machbarkeitsstudie kann ein Umstellungskonzept definiert werden, welches maßgebend für die sukzessive Umstellung der Busflotte auf Elektrobusbetrieb ist.

2. Planung: Sobald das Betriebskonzept und der Umstellungsplan als abgestimmt vorliegen, ist unter Berücksichtigung aller fachspezifischer Anforderungen schrittweise das Planungskonzept aufzustellen. Hauptbestandteil ist die konkrete Planung der notwendigen Infrastruktur sowie die Konzeption der Fahrzeuge. Des Weiteren ist die Ausrichtung der Werkstatt und der IT-Systemarchitektur auf die neue Technologie zu planen. Baubehördlich bewilligungspflichtige Baumaßnahmen sind zu identifizieren und im Rahmen des Baugenehmigungsverfahrens die Baugenehmigung zu erwirken. Der Zeitraum von der Erstellung der Bauantragsunterlagen bis zum Ausreichen der Baugenehmigung hat maßgeblichen Einfluss auf die Dauer dieser Projektstufe. Alle fachspezifischen Zusammenhänge, Vorgänge und Bedingungen sind im Rahmen dieser Projektstufe zu klären und im Planungskonzept verbal und zeichnerisch darzulegen. Ein Projektzeitplan sowie Kosten- und Finanzierungsplan sind aufzustellen. Sofern angestrebt wird, Fördermittel zur Kofinanzierung des Vorhabens einzuwerben, sind auf Grundlage des erarbeiteten Planungskonzepts die zuwendungsfähigen Kosten zu ermitteln und im Förderantrag zu begründen. Die Notwendigkeit der angestrebten Förderung ist durch den systembedingten Mehraufwand bei der Einführung von Elektrobussen und zugehöriger Infrastruktur zu belegen. Nicht zuletzt ist der ökologische Mehrwert aufzuzeigen.

3. Ausführungsvorbereitung: Sobald die Projektplanung durchgeführt wurde, der genehmigte Bauplan feststeht und die Finanzierung, bestenfalls durch das Bereitstellen öffentlicher Zuwendungen, gesichert ist, startet offiziell das Projekt. Es sind nun alle die Ausführungsvorbereitung betreffenden Maßnahmen umzusetzen. Mit dem Ziel, alle für die Projektumsetzung erforderlichen Leistungen an die ausführenden Firmen zu vergeben, ist für alle Leistungsbilder eine ausführungsreife Planung zu erstellen. Diese stellt Grundlage für die Ausschreibung der Leistungen dar. Die Durchführung der Ausschreibungs- und/oder Vergabeverfahren für die Beschaffung und Integration aller für das Elektrobussystem relevanten Komponenten – Fahrzeug, Infrastruktur, IT-Systeme, Werkstatteinrichtung, sicherheitstechnische Maßnahmen – ist wesentlicher Bestandteil dieser Projektstufe.

4. Ausführung: Mit Auftragserteilung beginnt die Ausführung der bezuschlagten Leistungen. Es erfolgt die Lieferung, Errichtung und Inbetriebnahme aller Systemkomponenten. Die Ausführungsleistungen umfassen die Fertigung und Lieferung der Fahrzeuge, die Lieferung und Installation der Ladeinfrastruktur, die Ausführung der Bauleistungen, die Umsetzung sicherheitstechnischer Maßnahmen, die Entwicklung und Modifizierung der IT-Systeme, die Ausstattung der Werkstatt sowie die Durchführung der Fahr- und Werkstattpersonalschulungen. Auf Einhaltung der vertraglich vereinbarten Leistungen, Kosten und Termine ist durch den Auftraggeber im Rahmen der Objektüberwachung hinzuwirken.

5. Projektabschluss: Abschließend erfolgen die Überprüfung, Abnahme und offizielle Übergabe des fertiggestellten Gesamtsystems. Eventuelle Mängel werden erfasst, behoben und alle relevanten Unterlagen übergeben, um den Übergang zur Nutzung zu ermöglichen. Nach erfolgreicher Integration des Gesamtsystems in den bestehenden Betriebsablauf erfolgt der Probetrieb, vorzugsweise außerhalb des realen Betriebs oder unter realen

Einsatz batterieelektrischer Busse im Verkehrsbetrieb Remscheid

Zusammenfassung und Ausblick

Einsatzbedingungen, mit Option zu jederzeitigem Wechsel auf Dieselseinsatz im Problemfall. Im Probetrieb sollten verschiedene betriebliche und verkehrliche Szenarien getestet werden. Nach Demonstration der vollen Betriebsfähigkeit des Systems kann die neue Antriebstechnik in den Regelbetrieb überführt werden.