

Umsetzungsplanung zur Einführung elektrisch angetriebener Linienbusse bei der Halleschen Verkehrs-AG

auf Grundlage der vorhandenen Elektrobustudie

Aggregierter Abschlussbericht, Juli 2019

Version 2.1



Auftraggeber:
**Nahverkehrservice Sachsen-
Anhalt GmbH**

Am Alten Theater 4
39104 Magdeburg

www.nasa.de

Auftragnehmer:
**VCDB VerkehrsConsult
Dresden-Berlin GmbH**

Könneritzstraße 31
01067 Dresden

Tel.: +49 .351 .4 82 31-00

Fax: +49 .351 .4 82 31-09

E-Mail: dresden@vcdb.de

Internet: www.vcdb.de

Ansprechpartner:
David Gersdorf
E-Mail: d.gersdorf@vcdb.de

Mareike Otte
E-Mail: m.otte@vcdb.de

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund und Zielsetzung	4
1.1	Ausgangslage	4
1.2	Zielsetzung	4
2	Verkehrlich-technische Betrachtung	5
2.1	Messtechnische Untersuchung	5
2.2	Energetisch anspruchsvollster Anforderungsfall	6
2.3	Rechnerische Ermittlung von Energiebedarfswerten.....	6
2.4	Nachladekonzept.....	6
2.5	Heizungs- und Klimatisierungskonzept	6
2.6	Energiespeicher	7
2.7	Auslegung der Ladeinfrastruktur.....	7
2.8	Ladezustand des Energiespeichers	7
2.9	Anpassungsbedarfe am Betriebshof	8
3	Ökologische Betrachtung.....	9
3.1	Umwelteffekte	9
3.2	Lärminderungspotenzial	9
4	Ökonomische Betrachtung	11
5	Handlungsempfehlungen.....	12
6	Fazit	13

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Fahrverlaufsanalyse	5
Abbildung 2.2:	Auslegung der Ladeinfrastruktur.....	7
Abbildung 2.3:	Energieverbrauchssimulation des Umlaufs 21/05- MD.....	8

Abkürzungsverzeichnis

AVAS	Acoustic Vehicle Alerting System (Akustisches Fahrzeug-Warnsystem)
BeSystO	Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV
HAVAG	Hallesche Verkehrs-AG
LTO	Lithium-Titanat-Oxid-Akkumulator
NASA	Nahverkehrsservice Sachsen-Anhalt GmbH
SOC	State of Charge
VCDB	VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH

1 Hintergrund und Zielsetzung

1.1 Ausgangslage

Aufbauend auf der landesweiten Machbarkeitsstudie zur Einführung elektrisch betriebener Linienbusse in Sachsen-Anhalt 2015 / 2016 beauftragte das Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr Sachsen-Anhalt (MLV) die Nahverkehrsservice Sachsen-Anhalt GmbH (NASA GmbH) mit der Vergabe und Begleitung einer detaillierten Umsetzungsplanung zur Einführung elektrisch angetriebener Linienbusse bei der Halleschen Verkehrs-AG (HAVAG) auf der Linie 21.

Seit Durchführung der Machbarkeitsstudie 2015 / 2016 hat die HAVAG betriebliche Anpassungen auf der untersuchten Linie 21 vorgenommen. Die für den Elektrobusbetrieb relevanten verkehrlichen Rahmenbedingungen, insbesondere Linienführung und Linienendpunkte, haben sich nur unwesentlich geändert, lediglich die Verschiebung der Wendezeiten zwischen den Endpunkten bedurfte einer gesonderten Berücksichtigung. Damit waren die grundsätzlichen Ergebnisse der Machbarkeitsstudie 2015 / 2016 einer ersten Einschätzung nach auf die zu untersuchende Linie 21 übertragbar.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Untersuchung ist es, die Ergebnisse aus der Elektrobusstudie aufzugreifen und die erforderlichen Planungen zu konkretisieren, um sowohl die Hallesche Verkehrs-AG als auch den zuständigen ÖPNV-Aufgabenträger in die Lage zu versetzen, abschließend über die Umsetzung des untersuchten Elektrobusprojektes zu entscheiden und dessen Realisierung anschließend unmittelbar beginnen zu können.

2 Verkehrlich-technische Betrachtung

Die Linie 21 wurden mit dem von der VCDB entwickelten Softwaretool Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV (BeSystO) auf ihre Eignung für den Elektrobuseinsatz untersucht. Um einen stabilen Elektrobuseinsatz über den gesamten Wochenverlauf zu ermöglichen sind gegenüber dem heutigen Einsatzkonzept mit Dieselnbussen betriebliche Anpassungen erforderlich, da derzeit bei einigen Umläufen keine ausreichenden Wendezeiten für die Zwischenladung am Linienendpunkt Kröllwitz zur Verfügung stehen. Ebenfalls bedienen die auf der Linie 21 eingesetzten Fahrzeuge zum Teil auch Nachtlinien. Demzufolge wurde ein Grundfahrplan seitens der HAVAG erarbeitet, welcher den Einsatz von Elektrobussen über den gesamten Wochenverlauf ermöglicht.

2.1 Messtechnische Untersuchung

Mit den VCDB-eigenen Messgeräten *DANAË mobile* wurde im Rahmen der messtechnischen Untersuchung GPS-basiert ein exaktes Abbild der Fahrtumläufe (vgl. Abbildung 2.1) über den gesamten Tag aufgezeichnet (IST-Fahrplan) und anschließend mit dem SOLL-Fahrplan der HAVAG verglichen. Da die auf diese Weise erhobenen Verspätungslagen baustellenbedingt als außergewöhnlich eingestuft wurden, wurde für die weitere Untersuchung auf von der HAVAG erhobene Verspätungsdaten zurückgegriffen.

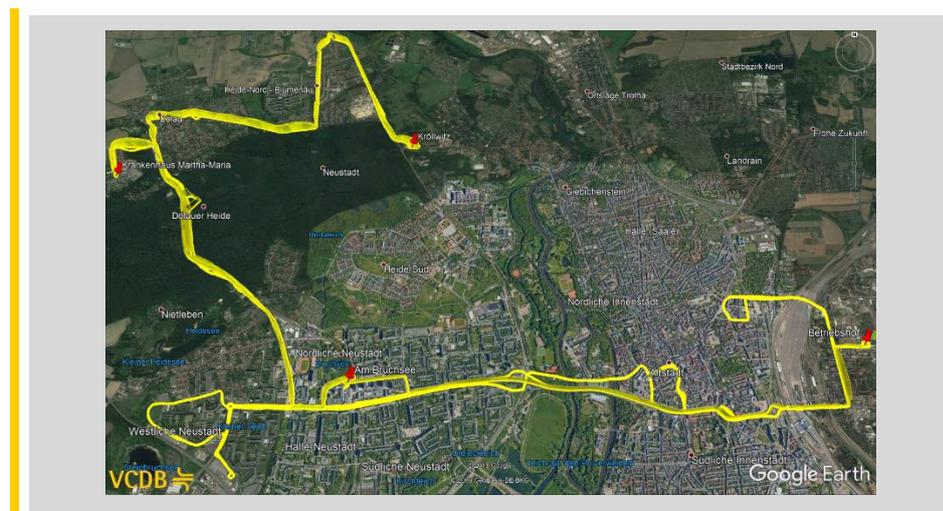


Abbildung 2.1: Fahrverlaufsanalyse

2.2 Energetisch anspruchsvollster Anforderungsfall

Die relevanten Umläufe wurden hinsichtlich Tagesfahrleistung, Ladezeit sowie einem zu erwartenden Energieverbrauch bewertet. Die Dienstkombination 21/05-MD mit anschließender Weiterführung als Linie 91 wurde als energetisch anspruchsvollster Umlauf identifiziert. Dieser bildete die Grundlage für die weitere Untersuchung.

2.3 Rechnerische Ermittlung von Energiebedarfswerten

Maßgeblich für die Berechnung von Energiebedarfswerten waren die Traktionsenergie unter Berücksichtigung verkehrlicher und topografischer Parameter und der Energiebedarf der Nebenverbraucher (vorrangig Heizung und Klimatisierung). Zusätzlich wurden weitere Zuschlagsfaktoren wie die Fahrzeugbelegung einbezogen. Der Energiebedarf während der Fahrt beträgt für Traktion und sonstige Verbraucher 1,24 kWh/km, am Wendepunkt im Stand sind 4,95 kWh/h notwendig.

2.4 Nachladekonzept

Die Linie 21 weist im energetisch anspruchsvollsten Fall auf dem Umlauf 21/05-MD hohe Tagesfahrleistungen von 380 km auf. Aufgrund dieser Entfernungen ist ausschließlich eine Auslegung als Gelegenheitslader möglich. Zur Umsetzung des Konzepts ist eine Zwischenladung auf der Strecke erforderlich, welche am Endpunkt Kröllwitz erfolgt. Zusätzlich werden die Fahrzeuge während der nächtlichen Betriebsruhe auf dem Betriebshof geladen, um am folgenden Tag mit vollständig geladenen Energiespeichern ausrücken zu können.

2.5 Heizungs- und Klimatisierungskonzept

Da bei Verwendung einer voll elektrischen Heizung der SOC (State of Charge) des Energiespeichers an kalten Tagen aufgrund des hohen Energiebedarfs zu stark abfällt und somit kein stabiler Elektrobetrieb gewährleistet werden kann, wurde für den spezifischen Anwendungsfall der Linie 21 die Verwendung einer Hybridheizung (elektrisch / Erdgas) empfohlen.

2.6 Energiespeicher

Für einen zuverlässigen Elektrobusbetrieb wurden die Fahrzeuge mit Lithium-Titanat-Oxid-Akkumulatoren (LTO) mit einer nominalen Kapazität von 150 kWh konfiguriert. Dies entspricht einem nutzbaren Energieinhalt von 120 kWh.

2.7 Auslegung der Ladeinfrastruktur

Es wurde empfohlen, für die Energieübertragung ein konduktiv stationäres System in Form einer Hub-Docking-Station vorzusehen. Die Energieübertragung erfolgt dabei mittels auf dem Fahrzeugdach befindlichen Pantografen und einer Ladehaube. Für die Strecke wurde dabei ein Lademast mit einer Ladeleistung von 300 kW empfohlen, im Betriebshof eine Lademastanlage mit drei Hauben und einer Ladeleistung von jeweils 100 kW. Veranschaulicht wird dies in Abbildung 2.2.

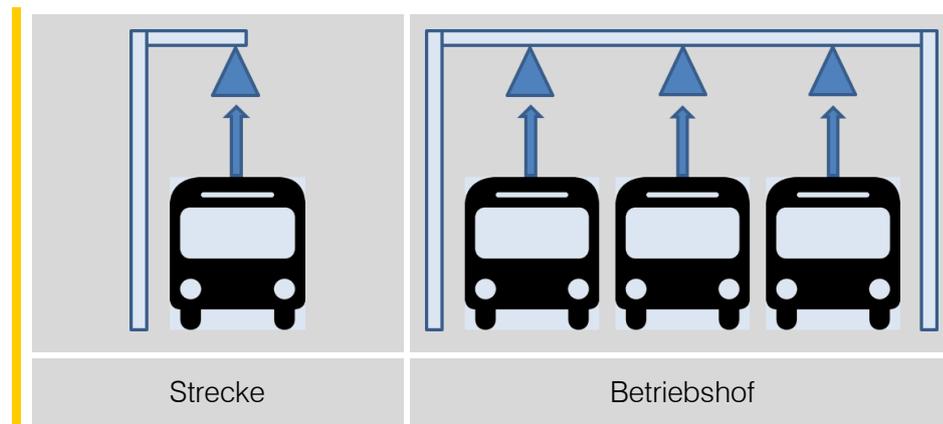


Abbildung 2.2: Auslegung der Ladeinfrastruktur

2.8 Ladezustand des Energiespeichers

Die grafische Simulation des Ladezustandsverlaufes SOC (State of Charge) zeigt einen gesamten Betriebstag des energetisch anspruchsvollsten Umlaufes 21/05-MD. Die Abbildung 2.3 zeigt den Energieverlauf im Bereich der nutzbaren Energiemenge des Energiespeichers ($SOC_{max} - SOC_{min}$) von 120 kWh. Die blaue Linie markiert zusätzlich die betriebliche Mindestreserve zum sicheren Erreichen des Betriebshofes aus dem Einsatzgebiet. Bei der Analyse des Ladezustandsverlaufs wurden im Einsatzkonzept keine kritischen Ladezustände ermittelt.

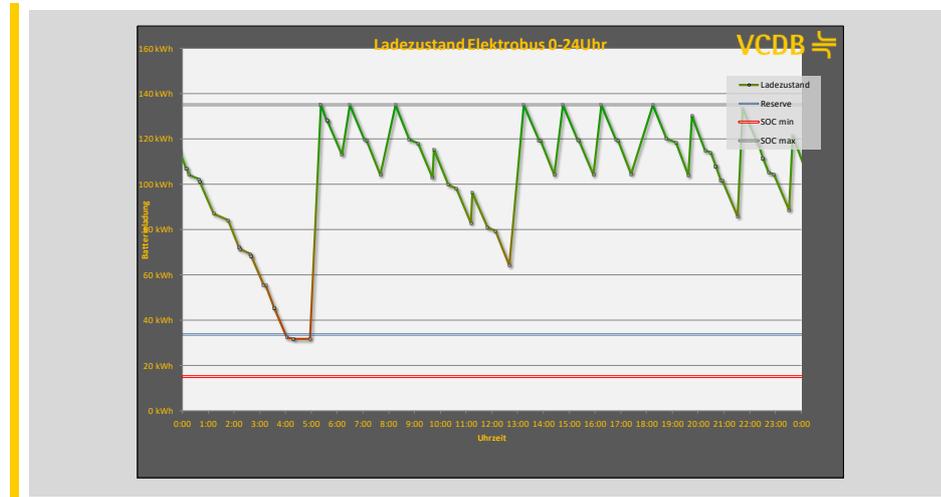


Abbildung 2.3: Energieverbrauchssimulation des Umlaufs 21/05-MD

2.9 Anpassungsbedarfe am Betriebshof

Der – insbesondere erstmalige – Einsatz von Elektrobussen stellt Verkehrsunternehmen vor vielfältige Herausforderungen, da sich der Betrieb eines Elektrobusses in verschiedenen Bereichen des Unternehmens auswirkt und dort technische, betriebliche und organisatorische Anpassungen erfordert.

Die Fahrzeugabstellung ist eng mit der Ladeinfrastruktur verbunden. So wurde eine Freiabstellung im südöstlichen Bereich der Busabstellfläche gewählt, wo ebenfalls entsprechende Ladeinfrastruktur errichtet wird.

Besondere Anpassungsbedarfe gibt es im Bereich der Buswerkstatt. Aufgrund der geringen Flottengröße und der zur Wartung von Elektrobussen derzeit ungeeigneten Buswerkstatt strebt die HAVAG zunächst einen Vollservicevertrag mit dem Hersteller an. Ergänzend sollen bereits zwei Mitarbeiter geschult und eine Grundausstattung für die Werkstatt beschafft werden.

3 Ökologische Betrachtung

3.1 Umwelteffekte

Die Ermittlung von Umwelteffekten erfolgte laufeleistungsbezogen für die Linie 21 mittels einer CO₂-Äquivalent-Bilanzierung als Vergleichsdarstellung zwischen dem konventionell angetriebenen Referenzbus (Dieselbus) und einem mit dem Strommix Sachsen-Anhalt bzw. regenerativ erzeugter Energie geladenen Elektrobus.

Bei Betrachtung des Strommix Sachsen-Anhalts (51 % regenerativ erzeugte Energie) entstehen bei Umstellung aller drei Dieselbusse (Referenzbus) auf Elektrobusbetrieb der größte Teil der CO₂-Äquivalent-Einsparungen in der Tank-to-Wheel Kette (alle direkten Emissionen des Fahrzeugbetriebes). Da bei der Erzeugung der Traktionsenergie keine lokalen Emissionen entstehen, kann im Vergleich zum Referenzbus pro Jahr 250.393 kg CO₂-Äquivalent eingespart werden. Dies entspricht einer Reduktion um 87 %. In der energetisch-ökologischen Gesamtbetrachtung der Well-to-Wheel-Kette werden die Emissionen der Energieherstellung, des -transports, der -umwandlung und des -verbrauchs berücksichtigt. Hierbei können 172.194 kg bzw. 49 % CO₂-Äquivalent eingespart werden.

Unter der Annahme, dass 100 % regenerativ erzeugte Energie zum Einsatz kommt, ist eine Reduktion des CO₂-Äquivalents von 283.894 kg in der gesamten Wirkungskette möglich. Dies entspricht einer Gesamteinsparung von 81 %.

3.2 Lärminderungspotenzial

Neben vermindertem Schadstoffausstoß weisen Elektrobusse signifikant geringere Lärmemissionen im Vergleich zum Dieselbus auf. Besonders Motorengeräusche sowie Geräusche der Abgasanlage entfallen bei Elektrobusen weitestgehend, wodurch die größten Lärminderungspotenziale im Bereich der Haltestellen zu erwarten sind.

Umfangreiche Lärmmessungen wurden durch die RWTH Aachen im Projekt EFBEL erfasst. Bei Dieselhybridbussen wurden durch das rein elektrische Anfahren eine Reduktion der Lautheit um über 65 % gegenüber konventionellem Dieselbussen ermittelt. Andere Vergleichsmessungen zwischen einem Elektrobus und einem EURO-6-Dieselbus ergaben, dass durch den

Ökologische Betrachtung

Elektrobus eine Lärmreduzierung von bis zu 16 dB(A) bei dem Verlassen einer Haltestelle erzielt werden kann.

Durch den rein elektrischen Antrieb von Elektrobussen ist eine effektive Reduktion der Geräuschemissionen im Fahrgastraum nachweisbar. Jedoch induziert die Leistungselektronik hochfrequente Geräuschanteile im Fahrgastraum, welche von den Fahrgästen vermehrt als störend wahrgenommen werden.

Eine weitere Herausforderung stellt das ab Juli 2021 in allen Elektrofahrzeugen verpflichtende System zur Geräuschsimulation AVAS (Acoustic Vehicle Alerting System) dar. Dabei werden die Geräuschemissionen wieder künstlich erhöht, was vorrangig auf Bestreben von Sehbehindertenverbänden zurückzuführen ist.

4 Ökonomische Betrachtung

Die Kostenbetrachtung erfolgte auf Basis der Kapitalwertmethode. Dabei fließen sämtliche Investitionskosten (Fahrzeug, Traktionskomponenten, Energiespeichersystem, Ladeinfrastruktur inkl. Errichtungskosten, Anschlusskosten an das örtliche Energienetz) und die erforderliche Erneuerung der Energiespeicher in bestimmten Intervallen unter Berücksichtigung der Kosten der Kapitalverzinsung ein. Weiterhin sind sämtliche Betriebskosten in der Betrachtung enthalten (Kraftstoff- bzw. Energiekosten, AdBlue, ggf. Heizöl, Wartung und Instandhaltung, Fahrzeugreserve zeitlich gestaffelt). Die Ausweisung der Betriebskosten erfolgt dabei laufeleistungsbezogen. Bei der Kostenermittlung wurde die Einbeziehung des in Sachsen-Anhalt implementierten Förderprogramms „Förderung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben für den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV)“, welches eine Förderung von 80 % auf die Investitionsmehrausgaben für den Kauf von Neufahrzeugen mit alternativen Antrieben für den ÖPNV gegenüber konventionellen Dieselfahrzeugen sowie den Kauf von Ladeinfrastruktur auf Betriebshöfen und für Zwischenladungen an Haltestellen vorsieht, berücksichtigt.

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines Elektrobusbetriebs wurde dieser einem Betrieb mit Dieselfbussen gegenübergestellt. Dabei wurde für beide Fahrzeuge eine Nutzungsdauer von 12 Jahren angesetzt, die sich aus dem Gesetz über den öffentlichen Personennahverkehr im Land Sachsen-Anhalt (ÖPNVG LSA) ergibt.

Der Kostenvergleich Elektrobus zum Dieselfbus ergab im Best-Case-Szenario (geringe Kostenentwicklung beim Elektrobus und hohe Kostenentwicklung beim Dieselfbus) einen Kostenmehraufwand i. H. v. 0,37 EUR/km für den Elektrobus ohne Förderung und einen Kostenvorteil i. H. v. 0,09 EUR/km mit Förderung. Weitere Szenarien zeigten Mehrkosten des Elektrobusbetriebs sowohl mit als auch ohne Förderung. In allen Fällen führt die Förderung zu einer Senkung der spezifischen Mehrkosten um 0,46 EUR/km.

Bei einer Betrachtung der Szenarien über lediglich zehn Jahre Einsatzzeit entstehen im Best-Case Mehrkosten von 0,44 EUR/km im ungeforderten Fall, mit einer Förderung ist ein Kostenvorteil von 0,08 EUR/km zu erreichen. Lässt man die Kostenentwicklung außen vor, entstehen Mehrkosten von 0,63 EUR/km bzw. 0,17 EUR/km ohne bzw. mit Förderung.

5 Handlungsempfehlungen

Für die Hallesche Verkehrs-AG wurde eine konkrete Umsetzungsstrategie zur Umstellung der Linie 21 auf Elektrobusbetrieb entwickelt. Ein Projektsteuerer sollte über den gesamten Projektzeitraum den Projektbeteiligten als „Kommunikationsstellwerk“ zur Verfügung stehen, um das Projekt „Elektrobusbetrieb Linie 21 HAVAG“ durch die Phasen der Ausschreibung, Implementierung und Regelbetrieb zu steuern.

Im Zuge der Ausschreibung sind bestehende Beschaffungsprozesse bei der HAVAG auf die elektrobusspezifischen Inhalte anzupassen. Hierfür wurde ein ausschreibungsfähiges Lastenheft für das Elektrobusgesamtsystem, bestehend aus drei Standard-Batteriebusen, Ladeinfrastruktur Strecke und Betriebshof sowie sonstiger Komponenten, entwickelt. Die Stadt Halle (Saale) als Aufgabenträger ist mit der Beantragung der Fördermittel der Förderrichtlinie „Förderung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben für den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV)“ betraut.

In der Phase der Implementierung erfolgt die Produktion der Batteriebusse und Ladeinfrastruktur sowie die Lieferung bzw. Errichtung der einzelnen Systemkomponenten. Die Inbetriebnahme des Gesamtsystems beinhaltet die Abnahme der Batteriebusse im Zusammenspiel mit der Ladeinfrastruktur an beiden Ladestandorten. Bei dem sich anschließenden Probebetrieb wird die Funktionsfähigkeit des Systems aus Batteriebusen und Ladeinfrastruktur unter realen Einsatzbedingungen im praktischen Betrieb nachgewiesen.

Die Aufnahme des Regelbetriebes (Linienbetrieb mit Fahrgästen) kann frühestens 22 Monate nach Projektbeginn erfolgen. Nach einer weitgehend störungsfreien Betriebszeit von sechs Monaten werden alle Batteriebusse im Zusammenspiel mit der Ladeinfrastruktur an beiden Standorten in einer Gesamtsystemabnahme endgültig abgenommen.

6 Fazit

Die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf der Linie 21 konnte unter Berücksichtigung betrieblicher Anpassungen betrieblich-technisch nachgewiesen werden. Basierend auf der Analyse der Umläufe ist der Einsatz von Elektrobussen im gesamten Wochenverlauf nur mit betrieblichen Anpassungen (Einsatzkonzept Grundfahrplan) möglich. Es ergeben sich bei Berücksichtigung der Förderrichtlinie „Förderung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben für den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV)“ im Best-Case-Szenario bei Anschaffung und Betrieb wirtschaftliche Vorteile des Elektrobussystems gegenüber dem Referenzbus. Auf Grundlage der standardisierten Ermittlung von Umwelteffekten konnte ein hoher ökologischer Mehrwert des Elektrobussystems auf der Well-to-Wheel-Kette nachgewiesen werden.

Demzufolge empfiehlt die VCDB die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf der Linie 21 unter der Voraussetzung, dass bei der Dienst- und Umlaufplanung das Einsatzkonzept Grundfahrplan berücksichtigt wird. Zudem sollte eine Verlängerung der Einsatzzeit des Elektrobusses angestrebt werden, um einen wirtschaftlichen Vorteil der Systemeinführung auch bei weniger vorteilhafter Kostenentwicklung als im Best-Case-Szenario erzielen zu können.

Des Weiteren sollten systembedingte Randbedingungen durch den Einsatz von Elektrobussen wie notwendige Ladeinfrastruktur bei der Ausgestaltung eines gesamtstädtischen Umsetzungskonzeptes zur schrittweisen Einführung elektrisch angetriebener Linienbusse auf weiteren Linien in der Stadt Halle (Saale) berücksichtigt werden. Hierbei könnten Synergieeffekte mit der vorliegenden detaillierten Umsetzungsplanung der Linie 21 erzielt werden.