

Umsetzungsplanung zur Einführung elektrisch angetriebener Linienbusse bei der Magdeburger Verkehrsbetriebe GmbH & Co. KG

auf Grundlage der vorhandenen Elektrobustudie

Aggregierter Abschlussbericht, Dezember 2019



Auftraggeber:
**Nahverkehrservice Sachsen-
Anhalt GmbH**

Am Alten Theater 4
39104 Magdeburg

www.nasa.de

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

Standort Dresden

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:

Matthias Kiepsch

E-Mail: m.kiepsch@vcdb.de

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund und Zielsetzung	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Zielsetzung	1
2	Verkehrlich-technische Betrachtung	2
2.1	Messtechnische Untersuchung	2
2.2	Energetisch anspruchsvollster Anforderungsfall	2
2.3	Energiebedarfswerte	3
2.4	Heizungs- und Klimatisierungskonzept	3
2.5	Auslegung Energiespeicher	4
2.6	Nachladekonzept	4
2.7	Auslegung der Ladeinfrastruktur	4
2.8	Darstellung des Ladezustandes (State of Charge - SOC) des Energiespeichers im Fahrzeug	5
3	Ökonomische Betrachtung	6
4	Ökologische Betrachtung	7
4.1	Umwelteffekte	7
4.2	Lärminderungspotenzial	8
4.2.1	Außengeräusche	8
4.2.2	Innengeräusche	8
5	Handlungsempfehlungen	9
6	Fazit	10

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Fahrtverlaufsanalyse Linie 73	3
Abbildung 2.2:	Auslegung der Ladeinfrastruktur auf der Strecke	4
Abbildung 2.3:	Simulation des Energieverbrauchs	5

Abkürzungsverzeichnis

BeSystO	Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV
CO ₂ -e	CO ₂ -Äquivalent
LHMD	Landeshauptstadt Magdeburg
LTO	Lithium-Titanat-Oxid-Akkumulator
MLV	Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr Sachsen-Anhalt
MVB	Magdeburger Verkehrsbetriebe GmbH & Co. KG
NASA GmbH	Nahverkehrsservice Sachsen-Anhalt GmbH
SOC	State of Charge (engl. Ladezustand)
VCDB	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 Magdeburger Verkehrsbetriebe GmbH & Co. KG (MVB) auf der Linie 73. Diese verkehrt zwischen den Linienendpunkten Olvenstedter Platz und Wissenschaftshafen.

Seit Durchführung der Machbarkeitsstudie 2015/2016 hat die MVB betriebliche Anpassungen auf der Linie 73 vorgenommen. Die für den Elektrobusbetrieb relevanten verkehrlichen Rahmenbedingungen haben sich grundlegend geändert. Demzufolge musste ein gesondertes Elektrobusbetriebskonzept entwickelt werden, um den Elektrobusbetrieb auf der Linie 73 abbilden zu können.

1.2 Zielsetzung

Ziel der Untersuchung ist es, die Ergebnisse aus der Machbarkeitsstudie von 2015/2016 aufzugreifen und die erforderlichen Planungen zu konkretisieren, um sowohl die MVB als auch den zuständigen ÖPNV-Aufgabenträger, die Landeshauptstadt Magdeburg (LHMD), in die Lage zu versetzen, abschließend über die Umsetzung des Elektrobusprojektes auf der Linie 73 zu entscheiden und dessen Realisierung unmittelbar nach Ende der Untersuchung beginnen zu können.

2 Verkehrlich-technische Betrachtung

Die Linie 73 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 fünf Dieselnissen (Bestandsystem) betriebliche Anpassungen erforderlich.

Demzufolge musste im Rahmen der detaillierten Umsetzungsplanung die Konfiguration des Elektrobussystems vollständig überprüft und betriebliche Anpassungen (Elektrobusbetriebskonzept) vorgenommen werden, um den Elektrobusbetrieb auf der Linie 73 mit fünf Elektrobussen abbilden zu können. Der Nachtbusverkehr wurde aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften aus der verkehrlich-technischen Betrachtung ausgeschlossen und im Rahmen der Gesamtbetrachtung anhand von zwei Dieselnissen berücksichtigt.

2.1 Messtechnische Untersuchung

Mit den 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 MVB verglichen.

2.2 Energetisch anspruchsvollster Anforderungsfall

Die Fahrplandaten (SOLL/IST) wurden hinsichtlich der Länge der Umläufe (alle Fahrten, die ein Fahrzeug im Tagesverlauf bedient), der zur Verfügung stehenden Wendezeiten sowie des zu erwartenden Energieverbrauchs ausgewertet. Als energetisch anspruchsvollster Anforderungsfall wurde der Umlauf *73-24-E-Mo-Fr* mit einer Tagesfahrleistung von 210 km identifiziert, welcher die Grundlage für die rechnerische Ermittlung der Energiebedarfswerte bildete.

Verkehrlich-technische Betrachtung

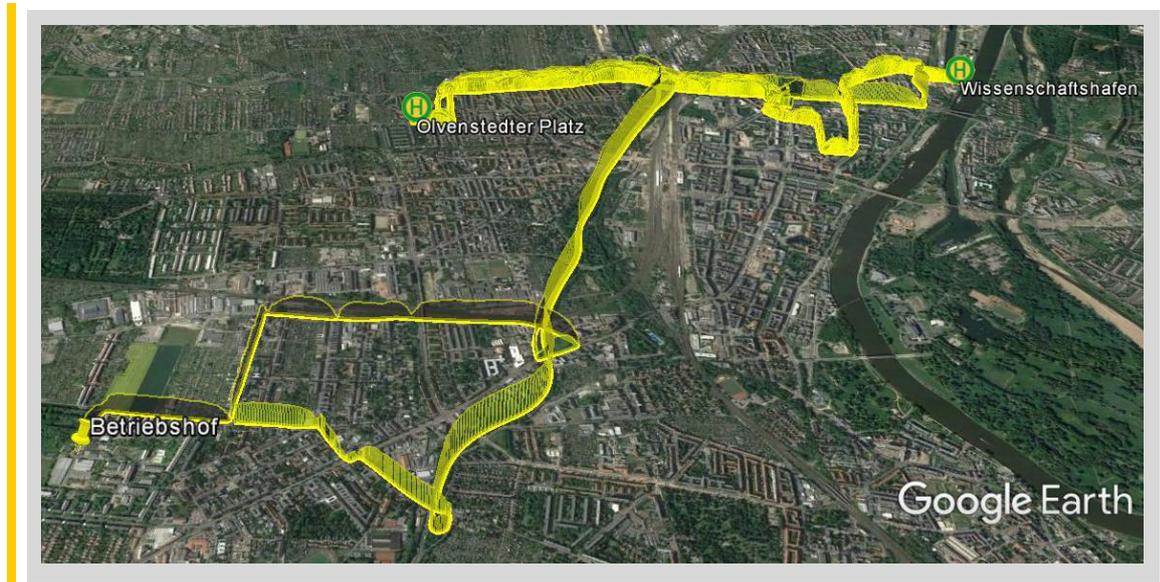


Abbildung 2.1: Fahrtverlaufsanalyse Linie 73

2.3 Energiebedarfswerte

Maßgebende Größen für die Ermittlung des Energiebedarfs waren die Traktionsenergie für den Fahrzeugantrieb und der Energiebedarf für die Nebenverbraucher (z. B. Heizung und Klimatisierung). Darüber hinaus wurden die Tagesfahrleistung, die durchschnittliche Fahrzeugbelegung und weitere Indikatoren als Zuschlagsfaktoren berücksichtigt.

Der Gesamtenergiebedarf des Elektrobusses wurde während der Fahrt auf der Linie mit 3,56 kWh/km und bei Stillstand am Linienendpunkt mit 22,60 kWh/h bestimmt.

2.4 Heizungs- und Klimatisierungskonzept

Das Heizungs- und Klimatisierungskonzept sieht die Vermeidung sämtlicher lokaler Schadstoffemissionen vor. Demzufolge kam nur der Einsatz einer vollelektrischen Heizung in Betracht. Bei einer vollelektrischen Heizung wird vollständig rein elektrisch geheizt und die Energie dafür aus dem Energiespeicher des Elektrobusses bezogen. Dies bedeutet, dass bei kalten Witterungsbedingungen der Energiebedarf für die notwendige Heizleistung stark ansteigt.

2.5 Auslegung Energiespeicher

Für den spezifischen Anwendungsfall der Linie 73 wurde für den Elektrobus ein Energiespeicher mit einer Kapazität von 150 kWh empfohlen. Um die hohe Anzahl an Ladezyklen mit entsprechend hohen Ladeleistungen dauerhaft bewältigen zu können, sollten Lithium-Titanat-Oxid-Akkumulatoren (LTO) verwendet werden.

2.6 Nachladekonzept

Aufgrund der hohen Tages-Fahrleistung von 210 km des energetisch anspruchsvollsten Umlaufs „73-24-E-Mo-Fr“ und der begrenzten Energiespeicherkapazität in Verbindung mit einer vollelektrischen Heizung, kommt nur das Ladekonzept des Gelegenheitsladers/Opportunity-Charging in Betracht. Demzufolge muss die Nachladung während des Linieneinsatzes auf der Strecke sowie während der nächtlichen Betriebsruhe auf dem Betriebshof erfolgen.

2.7 Auslegung der Ladeinfrastruktur

Für die elektrische Energiezuführung wurde die konduktiv-stationäre Energiezuführung in der Ausprägung als Docking-System empfohlen. Die Stromübertragung zwischen Fahrzeug und Ladeinfrastruktur erfolgt über eine Hub-Docking-Ladestation mittels Ladehaube und einem auf dem Fahrzeugdach befindlichen beweglichen Pantografen (vgl. Abbildung 2.2).

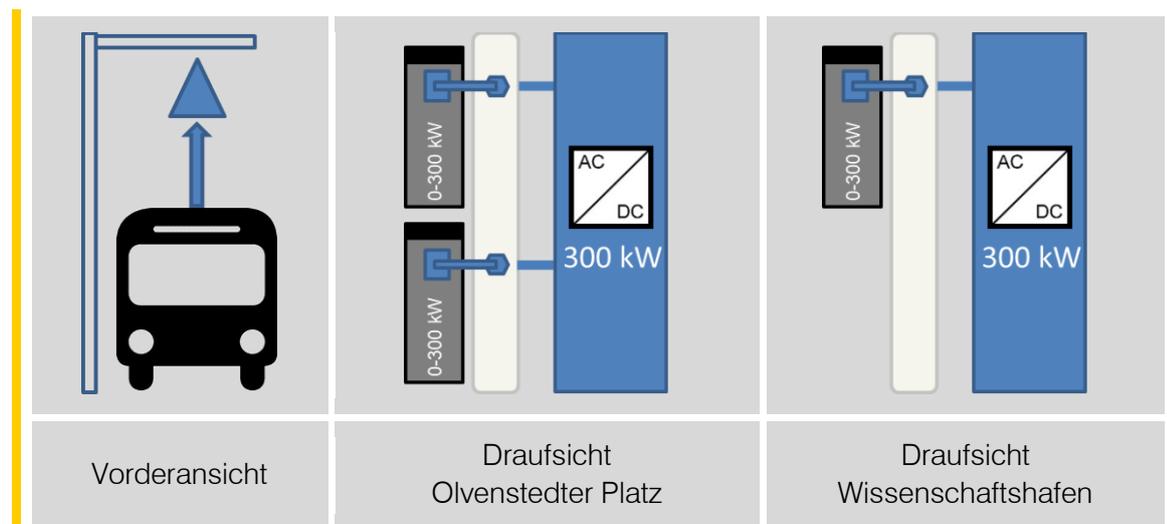


Abbildung 2.2: Auslegung der Ladeinfrastruktur auf der Strecke

Verkehrlich-technische Betrachtung

An beiden Linienendpunkten Olvenstedter Platz und Wissenschaftshafen wurden Hub-Docking-Ladestationen mit einer Ladeleistung von 300 kW empfohlen. Dabei sollen am Olvenstedter Platz zwei Ladepunkte und am Wissenschaftshafen ein Ladepunkt aufgebaut werden.

Im Falle der Übernachtladung während der nächtlichen Betriebsruhe wurde eine Hub-Docking-Ladestation mit einer Ladeleistung von 50 kW je Fahrzeug empfohlen. Für die Schnellladung während der Betriebspausen kann mittels Zusammenschaltung der Leistungseinheiten eine skalierbare Ladeleistung von bis zu 250 kW zur Verfügung gestellt werden.

2.8 Darstellung des Ladezustandes (State of Charge - SOC) des Energiespeichers im Fahrzeug

Die Simulation des Ladezustandsverlauf (State of Charge - SOC) des Energiespeichers im Fahrzeug erfolgte für alle Umläufe der Linie 73 über den gesamten Wochenverlauf. Für den energetisch anspruchsvollsten Umlauf 73-24-E-Mo-Fr ist der Ladezustandsverlauf für den gesamten Tagesverlauf in Abbildung 2.3 ersichtlich. Die technisch nutzbare Energiemenge des Energiespeichers ($SOC_{max}-SOC_{min}$) wurde auf 120 kWh festgelegt. Die blaue Linie markiert eine betriebliche Mindestspeicherreserve zum sicheren Erreichen des Betriebshofes von jedem Punkt der Strecke aus. Bei der Analyse des Ladezustandsverlaufs wurden im Elektrobusbetriebskonzept keine kritischen Ladezustände ermittelt.

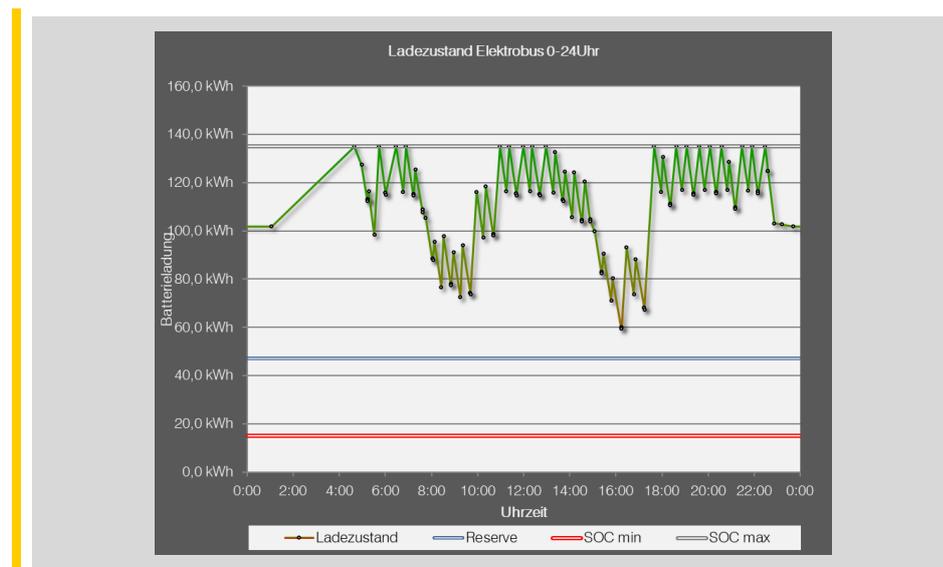


Abbildung 2.3: Simulation des Energieverbrauchs

3 Ökonomische Betrachtung

Die Kostenbetrachtung erfolgte auf Basis der Kapitalwertmethode, wonach sämtliche Investitionskosten (Fahrzeug, Traktionskomponenten, Energiespeichersystem, Ladeinfrastruktur inkl. Errichtungskosten, Anschlussherstellung an das örtliche Energienetz) unter Berücksichtigung der Kosten der Kapitalverzinsung ermittelt wurden.

Bei der Kostenermittlung wurde die Einbeziehung einer potentiellen Bundesförderung auf Basis der Inhalte der Förderrichtlinie „Richtlinien zur Förderung der Anschaffung von Elektrobussen im öffentlichen Personennahverkehr“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) berücksichtigt.

Um die Wirtschaftlichkeit des Elektrobusbetrieb auf der Linie bewerten zu können, wurde dieser dem Dieselfahrbetrieb gegenübergestellt. Hierbei wurde eine Nutzungsdauer des Elektrobussystems von zwölf Jahren unterstellt.

Zur Herstellung der Kostenwahrheit wurden im Rahmen der ökonomischen Betrachtung der Einsatz von zwei Dieselfahrzeugen im Nachtbusverkehr in Form von Betriebskosten berücksichtigt.

Der Kostenvergleich Elektrobuss zum Dieselfahrbetrieb ergab in allen drei betrachteten Szenarien einen Kostenmehraufwand, sowohl ohne als auch mit Förderung:

- ▶ Best-Case-Szenario : geringe Kostenentwicklung beim Elektrobuss & hohe Kostenentwicklung beim Dieselfahrbetrieb
- ▶ Middle-Case-Szenario: mittlere Kostenentwicklung beim Elektrobuss & mittlere Kostenentwicklung beim Dieselfahrbetrieb
- ▶ Worst-Case-Szenario: hohe Kostenentwicklung beim Elektrobuss & geringe Kostenentwicklung beim Dieselfahrbetrieb

4 Ökologische Betrachtung

4.1 Umwelteffekte

Die Ermittlung von Umwelteffekten erfolgte mittels einer lauffleistungsbezogenen CO₂-Äquivalent-Bilanzierung als Vergleichsdarstellung zwischen dem Bestandssystem mit Dieselbussen (Dieselbusflotte) und dem zukünftigen Elektrobussystem (Elektro- und Dieselbusflotte) gemäß DIN EN 16258-2013. Das Elektrobussystem wurde in der Betrachtung so angepasst, dass zwei Dieselbusse für den Nachtbusverkehr in die ökologische Betrachtung mit einbezogen wurden. Die Basis der Betrachtung der Umwelteffekte bildete der Energieverbrauch, die Menge an Treibhausgasemissionen, berechnet als CO₂-Äquivalent (CO₂-e), sowie die Kosten der CO₂-e Ausstöße.

Bei Betrachtung des Strommix Sachsen-Anhalt 2018 (51 Prozent regenerativ erzeugte Energie) entstanden bei der Umstellung auf Elektrobusbetrieb die größten ökologischen Effekte und damit die höchsten CO₂-e Einsparungen in der Tank-to-Wheel Kette (alle direkten Emissionen des Fahrzeugbetriebes). Im Vergleich zum Bestandssystem mit Dieselbussen (Dieselbusflotte) entstehen durch den Einsatz von Elektrobussen mit einer voll elektrischen Heizung (vgl. Kapitel 2.4) keine lokalen Emissionen. Lediglich infolge der transparenten Darstellung der tatsächlichen Umwelteffekte durch die Miteinbeziehung des Bedarfes an Dieselbussen für den Nachtbusverkehr wurden pro Jahr lokal 81.695 kg CO₂-e emittiert. Somit können 334.905 kg CO₂-e lokal eingespart werden, was einer Reduktion um 80 Prozent entspricht.

In der energetisch-ökologischen Gesamtbetrachtung der Well-to-Wheel Kette werden die Emissionen der Energieherstellung, des Energietransports, der Energieumwandlung und des Energieverbrauchs berücksichtigt. Beim Bestandssystem mit Dieselbussen werden derzeit 505.207 kg CO₂-e pro Jahr emittiert. Nach der Umstellung auf das Elektrobussystem (Elektro- und Dieselbusflotte) sinkt der Emissionswert auf nur noch 301.384 kg CO₂-e, was einer Gesamteinsparung von 40 Prozent entspricht.

4.2 Lärminderungspotenzial

Elektrobusse haben durch geringere lokale Lärmemissionen signifikante Vorteile gegenüber konventionellen Antriebstechnologien. So entfallen beim Elektrobus bspw. das Abgasanlagengeräusch gänzlich und das Motorgeschall weitestgehend. Demzufolge ist eine Reduktion der Lärmemissionen insbesondere im Haltestellenbereich zu erwarten.

4.2.1 Außengeräusche

Bei konventionellen Antriebstechnologien treten die höchsten Lärmemissionen am Heck des Fahrzeugs auf, da sich dort der Verbrennungsmotor befindet. Demzufolge lässt sich in diesem Bereich das größte Lärminderungspotenzial feststellen, da das Motorengeräusch bei Elektrobusen im Leerlauf vollständig entfällt.

Umfangreiche Lärmmessungen wurden durch die RWTH Aachen im Projekt EFBEL erfasst. Bei Dieselhybridbussen wurde beim rein elektrischen Anfahren eine Reduktion der Lautheit um über 65 Prozent gegenüber konventionellem Dieselbussen erfasst. Andere Vergleichsmessungen zwischen einem Elektrobus und einem EURO-6-Dieselbus ergaben, dass durch den Elektrobus eine Lärmreduzierung von bis zu 16 dB(A) bei dem Verlassen einer Haltestelle erzielt werden kann.

Vergleichsmessungen zwischen einem Elektrobus und einem EURO-6-Dieselbus ergaben, dass eine Reduktion der Schallpegel von bis zu 8 dB(A) bei der Vorbeifahrt an einer Haltestelle erzielt werden können.

4.2.2 Innengeräusche

Durch den rein elektrischen Antrieb von Elektrobusen ist eine effektive Reduktion der Geräuschemissionen im Fahrgastraum nachweisbar.

Bei Haltestellenabfahrt konnte durch den TÜV Nord eine Reduktion der Schalldruckpegel im Fahrzeuginnenraum bei Dieselhybridfahrzeugen im rein elektrischen Betrieb (60 – 77 db(A)) gegenüber konventionellen Dieselbussen (67 – 85 db(A)) nachgewiesen werden.

Allerdings induzierte die Leistungselektronik hochfrequente Geräuschteile im Fahrgastraum, welche von den Fahrgästen verstärkt wahrgenommen wurden.

5 Handlungsempfehlungen

Für die MVB wurde eine konkrete Umsetzungsstrategie zur Umstellung der Linie 73 auf Elektrobusbetrieb entwickelt. Ein Projektsteuerer sollte über den gesamten Projektzeitraum den Projektbeteiligten als „Kommunikationsstellwerk“ zur Verfügung stehen, um das Projekt „MVB Elektrobusbetrieb Linie 73“ durch die Phasen der Ausschreibung, Implementierung und Regelbetrieb zu steuern.

Im Zuge der Ausschreibung sind bestehende Beschaffungsprozesse bei der MVB auf die elektrobusspezifischen Inhalte anzupassen. Hierfür wurde ein ausschreibungsfähiges Lastenheft für das Elektrobusgesamtsystem, bestehend aus fünf Elektrobussen, Ladeinfrastruktur auf dem Betriebshof und Ladeinfrastruktur auf der Strecke (Olvenstedter Platz und Wissenschaftshafen) sowie sonstiger Komponenten, wie Werkstattausrüstung und Personalqualifizierung, entwickelt.

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

Die Aufnahme des Regelbetriebes (Linienbetrieb mit Fahrgästen) kann frühestens nach 41 Monate nach Projektbeginn erfolgen. Nach einer weitgehend störungsfreien Betriebszeit von sechs Monaten werden alle Elektrobusse im Zusammenspiel mit der Ladeinfrastruktur an beiden Standorten in einer Gesamtsystemabnahme endgültig abgenommen.

6 Fazit

Die Umsetzung des Einsatzes elektrisch angetriebener Linienbusse auf der Linie 73 konnte unter Berücksichtigung verkehrlicher, technischer, ökologischer und ökonomischer Aspekte nachgewiesen werden.

Der Betrieb der Linie 73 ist als Gelegenheitslader mit Nachladung an den Linienendpunkten Olvenstedter Platz und Wissenschaftshafen sowie einer Übernachtladung im Betriebshof beim Einsatz eines Energiespeichers von 150 kWh nur mit betrieblichen Anpassungen möglich. Hierfür wurde im Rahmen der detaillierten Umsetzungsplanung ein Elektrobusbetriebskonzept in enger Abstimmung mit der MVB entwickelt.

Selbst bei Berücksichtigung einer potentiellen Bundesförderung ergaben sich bei allen drei betrachteten Szenarien bei Anschaffung und Betrieb keine wirtschaftlichen Vorteile des Elektrobussystems gegenüber dem Bestandsystem.

Auf Grundlage der standardisierten Ermittlung von Umwelteffekten nach DIN EN 16258-2013 konnte bei Betrachtung des Strommix Sachsen-Anhalt 2018 ein hoher ökologischer Mehrwert des Elektrobussystems auf der Tank-to-Wheel Kette in Höhe von 80 Prozent CO₂-Äquivalent Einsparung und ein Mehrwert auf der Well-to-Wheel Kette in Höhe von 40 Prozent CO₂-Äquivalent Einsparung nachgewiesen werden.

Die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf der Linie 73 wird unter der Voraussetzung empfohlen, dass bei der Dienst- und Umlaufplanung das Elektrobusbetriebskonzept unter Berücksichtigung der herstellerspezifischen Auslegung des Elektrobussystems weiterentwickelt wird.