

Umsetzungsplanung zur Einführung elektrisch angetriebener Linienbusse bei der Dessauer Verkehrs GmbH

auf Grundlage der vorhandenen Elektrobusstudie

Aggregierter Abschlussbericht, Juni 2018



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	3
2.3	Energiebedarfswerte	3
2.4	Auslegung Energiespeicher	3
2.5	Heizungs- und Klimatisierungskonzept	3
2.6	Nachladekonzept	4
2.7	Auslegung der Ladeinfrastruktur	4
2.8	Ladezustand des Energiespeichers	5
2.9	Leistungsabforderung an der Ladeinfrastruktur	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 Linien 11 / 12.....	2
Abbildung 2.2:	Auslegung der Ladeinfrastruktur Strecke.....	4
Abbildung 2.3:	Simulation des Energieverbrauchs	5

Abkürzungsverzeichnis

BeSystO	Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV
CO ₂ -e	CO ₂ -Äquivalent
DVG	Dessauer Verkehrs GmbH
LVwA	Landesverwaltungsamt Sachsen-Anhalt
MLV	Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr Sachsen-Anhalt
NASA GmbH	Nahverkehrsservice Sachsen-Anhalt GmbH
SOC	State of Charge
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
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 Dessauer Verkehrs GmbH (DVG) auf den Linien 11 / 12.

Seit Durchführung der Machbarkeitsstudie 2015 / 2016 hat die DVG betriebliche Anpassungen auf den untersuchten Linien 10 / 11 / 12 vorgenommen. Die Linie 10 verkehrt nun separat als „Bauhauslinie“. Die Linien 11 / 12 verkehren zwischen den Haltestellen Tempelhofer Straße, Hauptbahnhof und Ebertallee. Die für den Elektrobusbetrieb relevanten verkehrlichen Rahmenbedingungen, insbesondere Linienführung, Linienendpunkte und Wendezeiten, haben sich trotz der oben genannten betrieblichen Anpassungen nur unwesentlich geändert. Damit waren die grundsätzlichen Ergebnisse der Machbarkeitsstudie 2015 / 2016 einer ersten Einschätzung nach auf den zu untersuchenden Linien 11 / 12 übertragbar.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser detaillierten Umsetzungsplanung war es, die Ergebnisse aus der Elektrobustudie aufzugreifen und die erforderlichen Planungen unter Berücksichtigung verkehrlicher, technischer, ökologischer und ökonomischer Aspekte zu konkretisieren, um sowohl die Dessauer Verkehrs GmbH als auch den zuständigen ÖPNV-Aufgabenträger in die Lage zu versetzen, abschließend über die Umsetzung des Einsatzes elektrisch angetriebener Linienbusse auf den Linien 11 / 12 zu entscheiden und dessen Realisierung anschließend unmittelbar beginnen zu können.

2 Verkehrlich-technische Betrachtung

Die Linien 11 / 12 wurden mit dem von der VCDB entwickelten Software-tool *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 Erdgasbussen betriebliche Anpassungen erforderlich, da bspw. am Einsatztag Sonntag derzeit keine ausreichenden Wendezeiten am Linienendpunkt Tempelhofer Straße zur Verfügung stehen. Ebenfalls bedienen die auf den Linien 11 / 12 eingesetzten Fahrzeuge am Wochenende sowohl Nachtlinien als auch die Linie 17. Demzufolge wurde ein „Einsatzkonzept Elektrobus“ in enger Abstimmung mit der DVG erarbeitet, welches den Einsatz von Elektrobussen über den gesamten Wochenverlauf ermöglicht.

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 DVG verglichen.

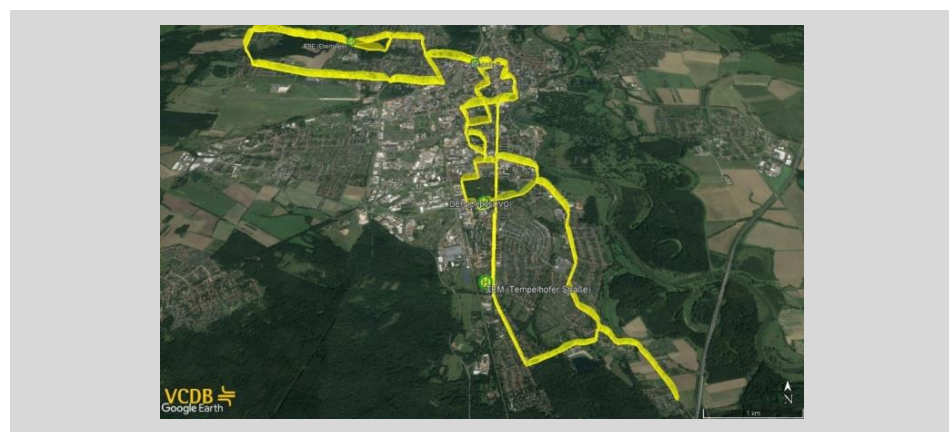


Abbildung 2.1: Fahrtverlaufsanalyse Linien 11 / 12

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 2103/2113 (Mo-Fr) mit einer Tagesfahrleistung von 334 km identifiziert, welcher die Grundlage für die rechnerische Ermittlung der Energiebedarfswerte bildete.

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 0,97 kWh/km und bei Stillstand am Linienendpunkt mit 4,05 kWh/h bestimmt.

2.4 Auslegung Energiespeicher

Für den spezifischen Anwendungsfall der Linien 11 / 12 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.

2.5 Heizungs- und Klimatisierungskonzept

Da bei Verwendung einer voll elektrischen Heizung der SOC (State of Charge) des Energiespeichers zu stark abfällt und somit kein stabiler Elektrobusbetrieb gewährleistet werden kann, wurde die für den spezifischen Anwendungsfall der Linien 11 / 12 die Verwendung einer Hybridheizung (elektrisch / Erdgas) empfohlen.

2.6 Nachladekonzept

Aufgrund der hohen Tagesfahrleistung von 334 km des energetisch anspruchsvollsten Umlaufs 2103 / 2113 kommt nur das Ladekonzept des Gelegenheitsladers in Frage, da derzeit keine Elektrobusse am Markt verfügbar sind, die in der Konfiguration als Voll-lader mit einer ausschließlichen Übernachtladung auf dem Betriebshof das entwickelte Betriebskonzept sicher bewältigen können. Demzufolge muss zusätzlich zur Übernachtladung im Betriebshof eine Nachladung während des Linieneinsatzes auf der Strecke (Tempelhofer Straße) erfolgen.

2.7 Auslegung der Ladeinfrastruktur

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

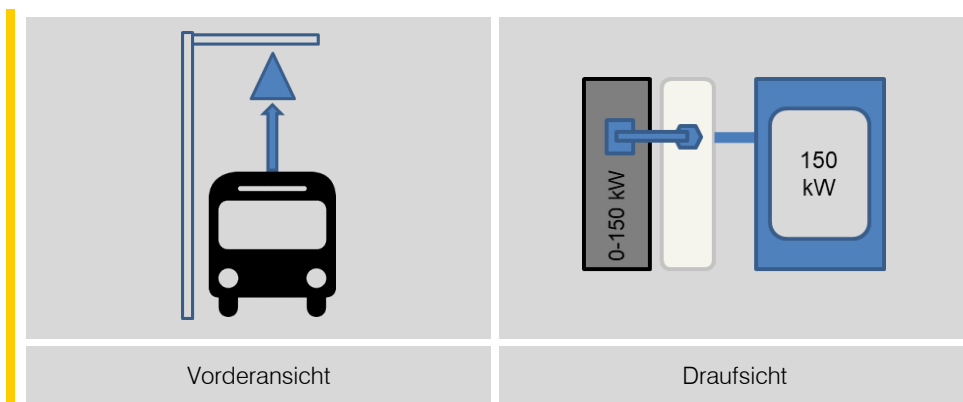


Abbildung 2.2: Auslegung der Ladeinfrastruktur Strecke

Am Linienendpunkt Tempelhofer Straße wurde eine Ladeleistung von 150 kW empfohlen, um den Energiespeicher des Elektrobusse im „Einsatzkonzept Elektrobus“ geeignet nachzuladen. Im Falle der Übernachtladung während der nächtlichen Betriebsruhe ist eine Ladeleistung von 50 kW je Fahrzeug ausreichend. Für die Schnellladung während der Betriebspausen kann mittels Zusammenschaltung der Ladeinfrastruktur eine skalierbare Ladeleistung von bis zu 150 kW zur Verfügung gestellt und somit eine Redundanz zur Ladestation an der Tempelhofer Straße geschaffen werden.

2.8 Ladezustand des Energiespeichers

Die Simulation des Ladezustandsverlauf (State of Charge - SOC) des Energiespeichers im Fahrzeug erfolgte für alle Umläufe der Linien 11 / 12 über den gesamten Wochenverlauf. Für den energetisch anspruchsvollsten Umlauf 2103 / 2113 ist der Ladezustandsverlauf für den gesamten Tagesverlauf in Abbildung 2.3 ersichtlich. Die technisch nutzbare Energiemenge des Energiespeichers ($SOC_{max} - SOC_{min}$) wurde auf 105 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 Einsatzkonzept Elektrobus keine kritischen Ladezustände ermittelt.

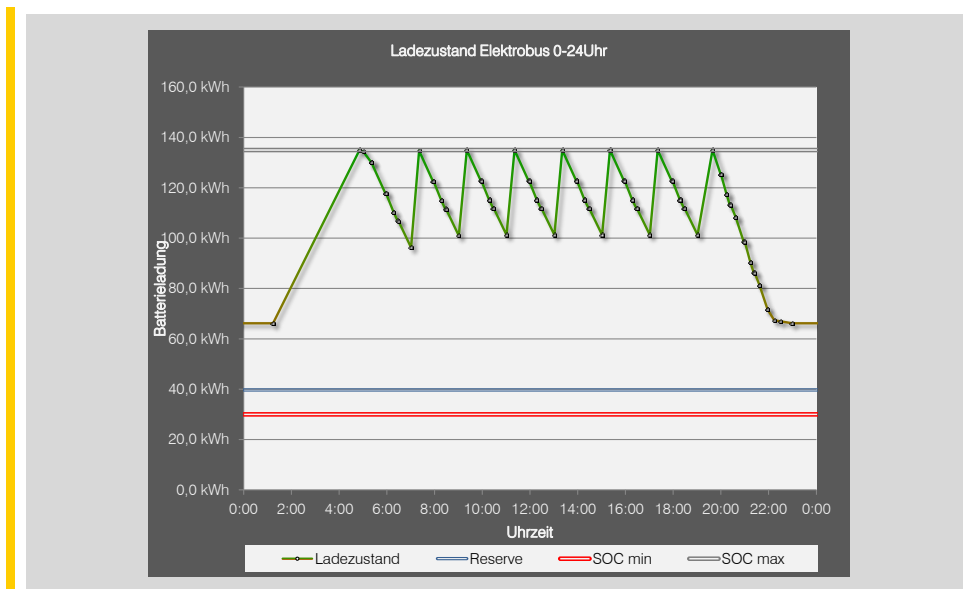


Abbildung 2.3: Simulation des Energieverbrauchs

2.9 Leistungsabforderung an der Ladeinfrastruktur

Die benötigte Leistungsabforderung am Linienendpunkt Tempelhofer Straße betrug 150 kW. Wochentags wurden in der Zeit von 6 Uhr bis 20 Uhr insgesamt 28 Ladevorgänge durchgeführt.

Die Übernachtladung der Elektrobusse im Betriebshof erfolgte mit einer Ladeleistung von 50 kW je Fahrzeug. Die einzelnen Nachladungen wurden über die Nacht verteilt, sodass eine gleichmäßige Leistungsabforderung am Anschlusspunkt der Energieversorgung (Trafostation) vorlag.

3 Ökonomische Betrachtung

Die Kostenbetrachtung erfolgte auf Basis der Kapitalwertmethode, wonach sämtliche Investitionskosten (Fahrzeug, Traktionskomponenten, Energiespeichersystem, Ladeinfrastruktur inkl. Errichtungskosten, Anschlussherstellung an das örtliche Energienetz) und die erforderliche Erneuerung des Energiespeichers in bestimmten Intervallen unter Berücksichtigung der Kosten der Kapitalverzinsung ermittelt wurden. Ebenfalls wurde das in Sachsen-Anhalt implementierte Förderprogramm „Förderung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben für den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV)“ berücksichtigt, welches eine prozentuale Förderung von 80 Prozent 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.

Um die Wirtschaftlichkeit des Elektrobusbetriebs auf den Linien bewerten zu können, wurde dieser dem Erdgasbusbetrieb gegenübergestellt. Hierbei wurde eine Nutzungsdauer für Elektrobusse von 16 Jahren und für Erdgasbusse von 12 Jahren unterstellt.

Der Kostenvergleich Elektrobus zum Erdgasbus ergab im Best-Case-Szenario (geringe Kostenentwicklung beim Elektrobus und hohe Kostenentwicklung beim Erdgasbus) einen Kostenmehraufwand für den Elektrobus ohne Förderung und einen Kostenvorteil mit Förderung.

Im Middle-Case-Szenario (mittlere Kostenentwicklung beim Elektrobus und mittlere Kostenentwicklung beim Erdgasbus) wurde ein Kostenmehraufwand ermittelt. Mit Förderung bestand weiterhin ein Kostenvorteil.

Lediglich im Worst-Case-Szenario (hohe Kostenentwicklung beim Elektrobus und geringe Kostenentwicklung beim Erdgasbus) entstanden Kostenmehraufwände sowohl mit als auch ohne Förderung.

4 Ökologische Betrachtung

4.1 Umwelteffekte

Die Ermittlung von Umwelteffekten erfolgte mittels einer lauleistungsbezogenen CO₂-Äquivalent-Bilanzierung als Vergleichsdarstellung zwischen dem konventionell angetriebenen Referenzbus (Erdgasbus) und einem mit verschiedenen Strommischen nachgeladenen Elektrobuss gemäß DIN EN 16258-2013. Die Basis der Betrachtung der Umwelteffekte bildeten der Energieverbrauch, die Menge an Treibhausgasemissionen, berechnet als CO₂-Äquivalent (CO₂-e), sowie die Kosten der CO₂-e-Ausstöße.

Bei Betrachtung des Strommix Sachsen-Anhalts (51 Prozent regenerativ erzeugte Energie) entstanden bei Umstellung aller vier Erdgasbusse (Referenzbus) auf Elektrobusbetrieb die größten ökologischen Effekte und damit die höchsten CO₂-Äquivalent-Einsparungen in der Tank-to-Wheel Kette (alle direkten Emissionen des Fahrzeugbetriebes). Da bei der Erzeugung der Traktionsenergie keine lokalen Emissionen entstanden, konnten im Vergleich zum Referenzbus pro Jahr 341.132 kg CO₂-Äquivalent eingespart werden. Dies entsprach einer Reduktion um 90 Prozent. Lediglich infolge der Nutzung der Hybridheizung (vgl. Kapitel 2.5) wurden lokal jährlich 37.789 kg CO₂-Äquivalent emittiert.

In der energetisch-ökologischen Gesamtbetrachtung der Well-to-Wheel Kette wurden die Emissionen der Energieherstellung, des -transports, der -umwandlung und des -verbrauchs berücksichtigt. Beim Einsatz der vier Erdgasbusse auf den Linien 11 / 12 wurden 434.761 kg CO₂-Äquivalent pro Jahr emittiert. Nach der Umstellung auf Elektrobusbetrieb mit vier Elektrobussen sank der Emissionswert auf nur noch 172.924 kg CO₂-Äquivalent. Dies entsprach einer Gesamteinsparung von 60 Prozent.

4.2 Lärminderungspotenzial

Elektrobusse haben durch geringere lokale Lärmemissionen signifikante Vorteile gegenüber konventionellen Antriebstechnologien. So entfallen beim Elektrobus bspw. das Abgasanlagengeräusch gänzlich und das Motorgeräusch 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 Dieselmotoren erfasst. Andere Vergleichsmessungen zwischen einem Elektrobus und einem EURO-6-Dieselmotoren 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-Dieselmotoren 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 bei Dieselhybridfahrzeugen im rein elektrischen Betrieb (60 – 77 db (A)) gegenüber konventionellen Dieselmotoren (67 – 85 db (A)) nachgewiesen werden.

Insbesondere induzierte die Leistungselektronik hochfrequente Geräuschanteile im Fahrgastraum, welche von den Fahrgästen verstärkt wahrgenommen wurden.

5 Handlungsempfehlungen

Für die Dessauer Verkehrs GmbH wurde eine konkrete Umsetzungsstrategie zur Umstellung der Linien 11 / 12 auf Elektrobusbetrieb entwickelt. Ein Projektsteuerer sollte über den gesamten Projektzeitraum den Projektbeteiligten als „Kommunikationsstellwerk“ zur Verfügung stehen, um das Projekt „*Elektrobusbetrieb Linien 11 / 12 DVG*“ durch die Phasen der Ausschreibung, Implementierung und Regelbetrieb zu steuern.

Im Zuge der Ausschreibung sind bestehende Beschaffungsprozesse bei der DVG auf die elektrobuspezifischen Inhalte anzupassen. Hierfür wurde ein ausschreibungsfähiges Lastenheft für das Elektrobusgesamtsystem, bestehend aus vier Standard-Batteriebusen, Ladeinfrastruktur Strecke und Betriebshof sowie sonstiger Komponenten, entwickelt. Die Stadt Dessau-Roßlau als Aufgabenträger ist mit der Beantragung der Fördermittel 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 Einsatzes elektrisch angetriebener Linienbusse auf den Linien 11 / 12 konnte unter Berücksichtigung verkehrlicher, technischer, ökologischer und ökonomischer Aspekte nachgewiesen werden.

Der Betrieb der Linien 11 / 12 ist als Gelegenheitslader mit Nachladung am Linienendpunkt Tempelhofer Straße und Übernachtladung im Betriebshof beim Einsatz eines Energiespeichers von 150 kWh nur mit betrieblichen Anpassungen möglich. Hierfür wurde im Rahmen der detaillierten Umsetzungsplanung ein "Einsatzkonzept Elektrobus" in enger Abstimmung mit der Dessauer Verkehrs GmbH entwickelt.

Bei Berücksichtigung einer Förderung der systembedingten Mehrkosten in Höhe von 80 Prozent ergaben sich im Best- und Middle-Case-Szenario bei Anschaffung und Betrieb wirtschaftliche Vorteile des Elektrobussystems gegenüber dem Referenzbus. Auf Grundlage der standardisierten Ermittlung von Umwelteffekten nach DIN EN 16258-2013 konnte ein hoher ökologischer Mehrwert des Elektrobussystems auf der Well-to-Wheel Kette nachgewiesen werden.

Demzufolge empfiehlt die VCDB die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf den Linien 11 / 12 unter der Voraussetzung, dass bei der Dienst- und Umlaufplanung das Einsatzkonzept Elektrobus und die herstellereigene Auslegung des Elektrobussystems berücksichtigt werden.

Des Weiteren sollten systembedingte Randbedingungen durch den Einsatz von Elektrobussen bei der Ausgestaltung eines gesamtstädtischen Umsetzungskonzeptes zur schrittweisen Einführung elektrisch angetriebener Linienbusse auf weiteren Linien in der Stadt Dessau-Roßlau berücksichtigt werden. Hierbei könnten hohe Synergieeffekte mit der vorliegenden detaillierten Umsetzungsplanung der Linien 11 / 12 erzielt werden.