VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH

Untersuchung zur Einführung elektrisch betriebener Linienbusse in Sachsen-Anhalt

unter besonderer Berücksichtigung von Emissionen und Wirtschaftlichkeit

Aggregierter Endbericht, 24.06.2016

Auftraggeber:
NASA GmbH

Am Alten Theater 4 und 6
39104 Magdeburg

http://www.nasa.de

Auftragnehmer:
VCDB
VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH

Könneritzstraße 31
01067 Dresden

Tel.: 0351/4 82 31 00
Fax: 0351/4 82 31 09

E-Mail: dresden@vcdb.de
Web: http://www.vcdb.de

Ansprechpartner:
Dr. Thomas Otto
E-Mail: t.otto@vcdb.de

Matthias Kiepsch
E-Mail: m.kiepsch@vcdb.de

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 2

2 Linienuntersuchung 4

2.1 BeSystO 4
2.1.1 Was ist BeSystO? 4
2.1.2 BeSystO als Verfahrensgrundlage für die Machbarkeitsstudie 4
2.1.3 Wie funktioniert BeSystO? 4
2.1.4 Welches Ergebnis liefert BeSystO? 6
2.2 Netzuntersuchung/Linienidentifikation 7
2.2.1 Liniendaten 7
2.2.2 Liniencharakteristik 7
2.2.3 Streckenanalyse 8
2.3 Konfiguration Elektrobussystem 10
2.3.1 Fahrzeugseitige Systemkomponenten 10
2.3.2 Auswahl Ladestrategie 10
2.3.3 Auslegung Energiespeicher 11
2.3.4 Auslegung Ladeinfrastruktur 13
2.4 Ökonomische Betrachtung 14
2.5 Ökologische Betrachtung 15

3 Stand der Technik 16

3.1 Elektrische Busse 17
3.1.1 Nomenklatur 17
3.1.2 Elektrische Antriebskonzepte 17
3.2 Energiespeicher 19
3.3 Ladeinfrastruktur 21

Inhaltsverzeichnis

3.3.1 Möglichkeiten der elektrischen Energiezuführung 21
3.3.2 Oberleitung (konduktiv-dynamisch) 23
3.3.3 Docking-Station (konduktiv-stationär) 24
3.3.4 Ladepunkt Oberleitung (konduktiv-stationär) 25
3.3.5 Fahrzeugseitiges Ladegerät (Plug-In-System) 26
3.3.6 Stationäres Ladegerät (Plug-In-System) 28
3.3.7 Induktionsschleife/Pick-Up (induktiv-stationär) 29
3.3.8 Zusammenfassung 30

4 Bestandsaufnahme Infrastruktur und Fahrzeuge ... 31
4.1 Übersicht Verkehrsunternehmen 31
4.2 Erhebungsdesign 32
4.3 Ergebnisse 33
4.3.1 Fahrzeugflotte im Bestand 33
4.3.2 Geplante Erst- und Ersatzbeschaffungen 36
4.3.3 Umweltbetrachtung der Fahrzeugflotte 38

5 Handlungsempfehlungen 42
5.1 Zusammenfassende Bewertung 42
5.2 Roadmap Elektromobilität im ÖPNV 45

Anlage Verkehrsunternehmensspezifische Linienuntersuchung

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildung 1: BeSystO – Module 5
Abbildung 2: Prozessablauf einer BeSystO-Analyse 6
Abbildung 3: Grafische Auswertung einer Fahrtverlaufsanalyse 8
Abbildung 4: Simulation des Energieverbrauchs SOLL-Fahrplan 12
Abbildung 5: Simulation des Energieverbrauchs IST-Fahrplan 12
Abbildung 6: Konfigurationsmöglichkeiten für den Elektrobus 18
Abbildung 7: Möglichkeiten der elektrischen Energiezuführung 21
Abbildung 8: Stromabnehmer bei Oberleitungsbussen 23
Abbildung 9: Docking-Station-Systeme 24
Abbildung 10: Stromabnehmer von Schunk 25
Abbildung 11: Ladekabel AC-Ladung (Mode 2) 26
Abbildung 12: Ladekabel AC-Ladung (Mode 3) 27
Abbildung 13: Combostecker Typ CCS 850 V 28
Abbildung 14: Abnehmerspule im Fahrzeugboden (Pick-Up) 29
Abbildung 15: Aufteilung Fahrzeugtypen 33
Abbildung 16: Aufteilung Antriebsarten 34
Abbildung 17: Verteilung Fahrzeugflottenalter 34
Abbildung 18: Aufteilung EURO Normen 35
Abbildung 19: Entwicklung der lokalen Emissionen 41
Abbildung 20: Roadmap Elektromobilität im ÖPNV 45
Abbildung 21: Matrix zur Eignungsbewertung 46

Tabelle 1: Bewertung Energiezuführungssysteme 30
Tabelle 2: Geplante Erst- und Ersatzbeschaffungen 36
Tabelle 3: Entwicklung der lokalen Emissionen (Szenario HBEFA) 38
Tabelle 4: Entwicklung der lokalen Emissionen (Szenario E-Bus) 39

Abkürzungsverzeichnis

AC	Alternating Current (Wechselstrom)
BeSystO	Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV
BEV	Battery Electric Vehicle (Batterieelektrisches Fahrzeug)
BIF	Bestandsaufnahme Infrastruktur Fahrzeuge
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
CO_2-e	CO_2-Äquivalent
DC	Direct Current (Gleichstrom)
GPS	Global Positioning System (Globales Positionsbestimmungssystem)
HBEFA	Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
ICCB	In-Cable Control Box (In-Kabel Kontrollbox)
LC	Life-Cycle (Lebenszyklus)
MLV	Ministerium für Landesentwicklung und Verkehr
NASA	Nahverkehrsservice Sachsen-Anhalt GmbH
O-Bus	Oberleitungsbus
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle (Plug-In Hybridfahrzeug)
REEV	Range Extended Electric Vehicle (Fahrzeug mit Reichweitenverlängerer)
SOC	State Of Charge (Ladezustand)
SORT	Standardised On-Road Test cycles (SORT-Klassen)
TCO	Total Cost of Ownership (Gesamtbetriebskosten)
TOPO	Topographie (TOPO-Klassen)
VCDB	VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH
~	Phase (Wechselstrom)

1 Einleitung

Elektromobilität gilt heute als Zukunftstechnologie für die Reduzierung verkehrsbedingter Emissionen von Kohlendioxid, weiterer Luftschadstoffe und Lärm. Für das Erreichen der nationalen und internationalen Klimaschutzziele wird oft postuliert, dass eine Energiewende nur gelingen kann, wenn sie von einer Mobilitätswende begleitet wird. Voraussetzung ist freilich die Verwendung von regenerativ erzeugtem Strom.

Der ÖPNV-Sektor nimmt als Mitglied des Umweltverbundes seit jeher eine Vorreiterrolle bei umwelt- und klimafreundlicher Mobilität ein. Nachdem schienengebundene öffentliche Verkehrsmittel schon lange zu einem erheblichen Anteil elektrisch angetrieben werden und damit zumindest lokal emissionfrei unterwegs sind, hat sich in der Branche im Zuge der neuen Entwicklungen in der Elektromobilität zunehmend der Anspruch etabliert, auch den Busbereich in absehbarer Zeit zu elektrifizieren.

In Sachsen-Anhalt besteht neben der verkehrspolitischen Zielstellung der Reduzierung verkehrsbedingter Emissionen, insbesondere der CO_2-Emmissionen, auch die Zielstellung, Ansätze zu unterstützen, die eine Stärkung des ÖPNV befördern. Durch eine Elektrifizierung des ÖPNV werden fossile Energieträger substituiert, der Anteil von „grünem Strom“ weiter ausgebaut und somit ein Zeichen für nachhaltige Mobilität gesetzt.

Die Entscheidung des Ministeriums für Landesentwicklung und Verkehr Sachsen-Anhalt (MLV), gezielt Maßnahmen zur Einführung alternativ betriebener Busse zu unterstützen, ist weitsichtig und nachhaltig. Denn ein moderner und elektromobiler ÖPNV unterstützt die Ziele des Klimaschutzes auf drei Wegen:

- durch die Reduzierung bzw. den weitestgehenden Wegfall der eigenen Emissionen (Luftschadstoffe und Lärm),
- durch die hohe Kontaktdichte als Vermittler der Idee funktionierender Elektromobiliät und
- durch intermodale Verlagerungspotentiale, die ein moderner und attraktiver ÖPNV erzeugt.

Die Nahverkehrsservice Sachsen-Anhalt GmbH (NASA) hat im Auftrag des MLV in diesem Kontext eine Machbarkeitsstudie zur Einführung des Elektrobusbetriebs im Land Sachsen-Anhalt beauftragt. Die Machbar-

keitsstudie dient dem Nachweis der Umsetzbarkeit des Vorhabens und dem Aufzeigen der entsprechenden Umsetzungsparameter.

Das Ergebnis der Machbarkeitsstudie liefert im Konkreten eine verkehrlich, technisch, ökologisch und wirtschaftlich neutrale Beurteilung der Projektidee unter Betrachtung verschiedener Umsetzungskonzepte. Es wurden insgesamt elf Verkehrsunternehmen hinsichtlich des geplanten Elektrobuseinsatzes untersucht. Im Rahmen der Untersuchung werden die Parameter ermittelt, die den Elektrobusbetrieb auf einer Linie der beteiligten Verkehrsunternehmens ermöglicht.

Auf Basis der Machbarkeitsstudie wird ein Umsetzungskonzept mit definierten Handlungsschritten und klar formulierten Anforderungen zur schrittweisen Einführung des Elektrobusbetriebs in Sachsen-Anhalt entwickelt.

2 Linienuntersuchung

2.1 BeSystO

2.1.1 Was ist BeSystO?

BeSystO bedeutet „Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV“. Es ist ein integriertes und dynamisches Softwaretool, welches auf Basis standardisierter Berechnungsalgorithmen und individuell an den jeweiligen Bewertungsfall angepasster Parameter Elektromobilitätskonzepte untersucht und bewertet. Die Bewertung mit BeSystO erfolgt auf Grundlage technischer, betrieblicher, betriebswirtschaftlicher und ökologischer Bewertungskriterien.

Das Bewertungsverfahren BeSystO wurde entwickelt um potentielle Anwender der Elektromobilität (Verkehrsunternehmen) dabei zu unterstützen, aus dem vielfältigen Angebot von Elektrobus-Systemkomponenten, das für sie geeignete System bzw. die richtige Kombination von Systemen zu identifizieren und wirtschaftlich zu bewerten.

2.1.2 BeSystO als Verfahrensgrundlage für die Machbarkeitsstudie

Wesentliche Aufgabenstellungen, wie die Liniennetzanalyse mit anschließender Auswahl geeigneter Linien, die Erarbeitung von Betriebskonzepten, die Konfiguration von Fahrzeugaufbau- und ausrüstung sowie der Ladeinfrastruktur in Verbindung mit geeigneten Ladestrategien, energetische Betrachtungen, umfassende betriebswirtschaftliche Untersuchungen und schließlich die Well-to-Wheel-Analyse von Umwelteffekten sind in BeSystO implementiert.

2.1.3 Wie funktioniert BeSystO?

BeSystO ist modular aufgebaut. Die Einzelmodule liefern eine makroskopische Untersuchung zu Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit eines Elektrobuseinsatzes in einem definierten Einsatzgebiet.

Die beiden Hauptmodule von BeSystO sind (vgl. Abbildung 1):

- BeSystO-SOC (SOC = State Of Charge)
- BeSystO-TCO (TCO = Total Cost of Ownership)

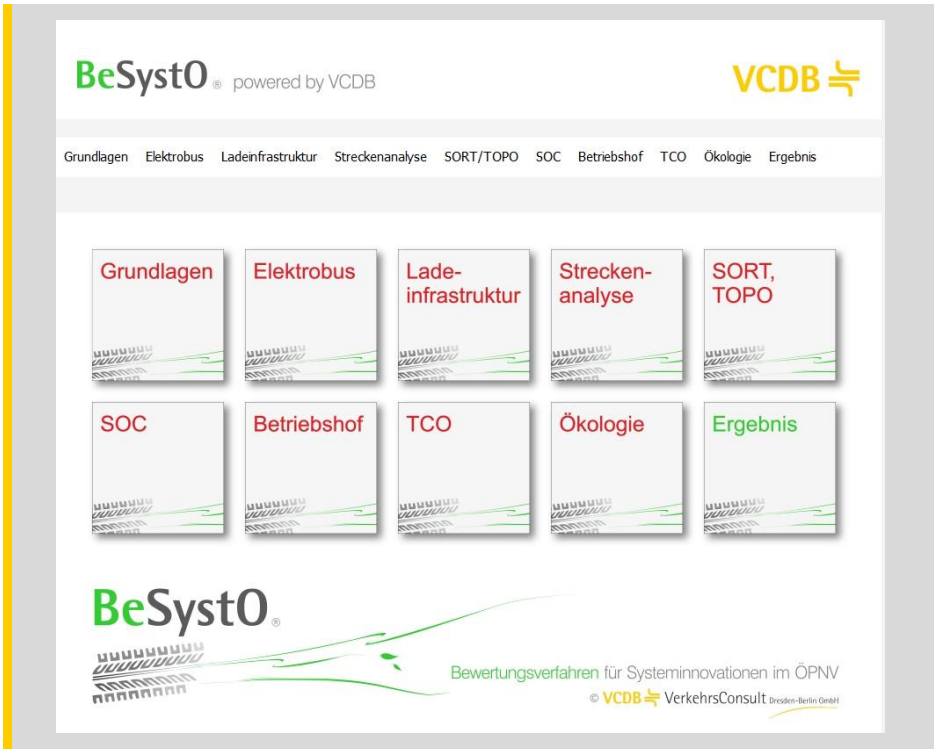


Abbildung 1: BeSystO – Module

Das Hauptmodul BeSystO-SOC leistet dabei die energetische Bewertung der untersuchten Linien bzw. des jeweiligen Fahrzeugumlaufs sowie die Ermittlung von Energiebedarfen, die Auslegung von Fahrzeugen, Energiespeichersystemen und Ladeinfrastrukturen sowie die Simulation des Energieflusses und des Ladezustands über komplette Betriebstage.

Das Hauptmodul BeSystO-TCO liefert die gesamtwirtschaftliche Bewertung des definierten Elektrobussystems auf Basis der Kapitalwertmethode, sowohl absolut als auch laufleistungsbezogen. Dabei beschränkt sich BeSystO-TCO nicht auf die Betrachtung von Investitionen sondern betrachtet sämtliche technische und betriebliche Aspekte (z. B. Personalschulungen, Systemerneuerungen nach bestimmten Fristen, etc.). Die Auswertung erfolgt sowohl bezogen auf das Elektrobussystem als auch vergleichend mit konventionellen Antriebssystemen. Zudem ist eine Betrachtung ökologischer Auswirkungen inklusive einer Monetarisierung des CO_2-Ausstoßes in BeSystO-TCO integriert.

Die systeminterne dynamische Verknüpfung der einzelnen Module ermöglicht den Vergleich verschiedener Konfigurationen eines Elektrobussystems. Alle Haupt- und Teilmodule greifen dabei auf die gleiche Datenbasis zu, so dass unnötig redundante und somit im dynamischen Prozess fehleranfällige Doppeldaten ausgeschlossen sind.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wird der Anwender über die Variation verschiedener Einflussgrößen (Auslegungsgröße des Energiespeichers, Laderstrategie, Ladetechnologie, etc...) in die Lage versetzt, sich iterativ dem betrieblichen und wirtschaftlichen Optimum anzunähern.

BeSystO ist an die Anforderungen und Rahmenbedingungen des Kunden adaptierbar. Bevorstehende Systementscheidungen, strategische Ausrichtungen oder Vorgaben können so einbezogen werden (vgl. Abbildung 2).

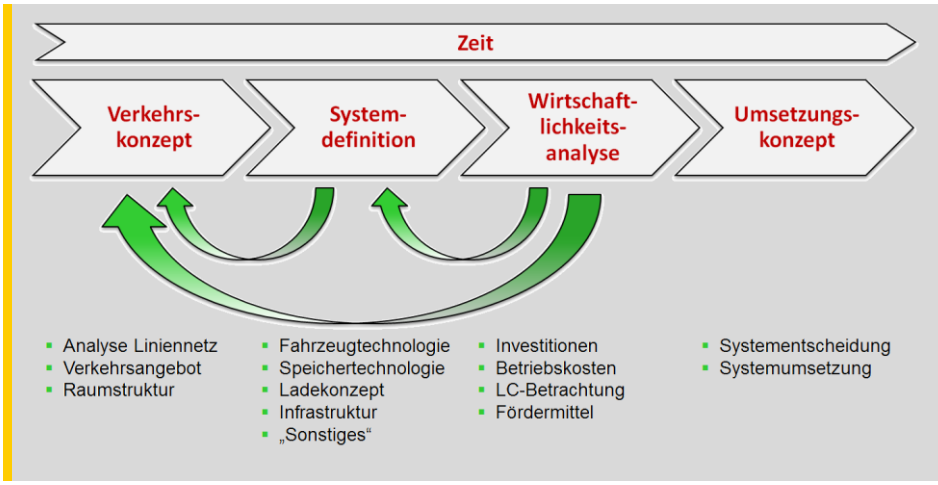


Abbildung 2: Prozessablauf einer BeSystO-Analyse

2.1.4 Welches Ergebnis liefert BeSystO?

Mit BeSystO kann eine grundsätzliche Bewertung des Elektrobuseinsatzes im definierten Bezugsraum erzeugt werden. Im Ergebnis werden mit BeSysto genaue Leistungsinhalte im Sinne eines Umsetzungskonzeptes definiert. Dabei liefert BeSystO die Anforderungen, wie das Elektrobussystem für den Anwendungsfall im jeweiligen Verkehrsunternehmen grundlegend aufgebaut und ausgelegt werden sollte. BeSystO zeigt außerdem auf, welche betriebswirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen die Systemumstellung generiert.

Im Verlauf des Bewertungsverfahrens werden die einzelnen Prozessschritte mehreren Iterationen unterzogen, in denen das Verkehrskonzept, das definierte technische System und die Wirtschaftlichkeit optimal aufeinander abgestimmt werden. Am Ende dieses BeSystO-Prozesses steht ein fertiges Umsetzungskonzept, welches bei den Verkehrsunternehmen direkt in die Projektsteuerungsphase überleiten kann.

2.2 Netzuntersuchung/Linienidentifikation

2.2.1 Liniendaten

Für die Linienuntersuchung werden die Liniendaten in geeigneter Detailtiefe aufgenommen. Aus diesen Angaben lassen sich erste Rückschlüsse auf die Eignung der Linie als Elektrobuslinie ziehen. Relevante Parameter hierfür sind betriebliche Daten wie Linienlänge, Fahrzeit und Geschwindigkeitsprofil sowie die Jahreslaufleistung und Jahresbetriebsdauer, die auf Basis aller in der Untersuchung betrachteter Umläufe ermittelt wird.

2.2.2 Liniencharakteristik

In die Untersuchung sind die verkehrlichen und topographischen Liniencharakteristika einzubeziehen, da diese neben den betrieblichen Linieneigenschaften maßgeblich den Energieverbrauch des Elektrobusses bestimmen. Die Linienklassifizierung nach verkehrlichen und topographischen Kriterien (SORT- und TOPO-Klassen) erfolgt auf Basis der umlaufspezifischen Fahrtrajektorien, die im Rahmen von Messfahrten ermittelt werden.

Die Bewertung der verkehrlichen Parameter erfolgt anhand von SORT-Zyklen (Standardised On-Road Test cycles). Diese werden als international anerkannter Standard für den Vergleich von Energieverbräuchen bei Stadtbussen herangezogen:

- SORT 1 – Zyklus für den schweren Stadtverkehr,
- SORT 2 – Zyklus für den leichten Stadtverkehr,
- SORT 3 – Vorstadtverkehr.

Um den Einfluss der Streckentopographie auf den Energieverbrauch zu berücksichtigen, wurden von der VCDB folgende drei TOPO-Klassen definiert:

- TOPO 1 – schwere Topografie/Bergland,
- TOPO 2 – leichte Topografie, welliges bis hügeliges Terrain,
- TOPO 3 – Flachland.

Die Linienklassifizierung anhand der vorgenommenen SORT- und TOPO-Einstufung ermöglicht die Bestimmung des zusätzlichen Energieverbrauchs pro Betriebstag und Bus unter Berücksichtigung des realen Verkehrsablaufs. Zur Vervollständigung der Liniencharakteristika ermöglicht die Darstellung des tatsächlichen Linienverlaufs auf Basis der umlaufspezifischen Fahrtrajektorien einen detaillierten Einblick in den Fahrtverlauf und das zu bewältigende Höhenprofil (vgl. Abbildung 3).

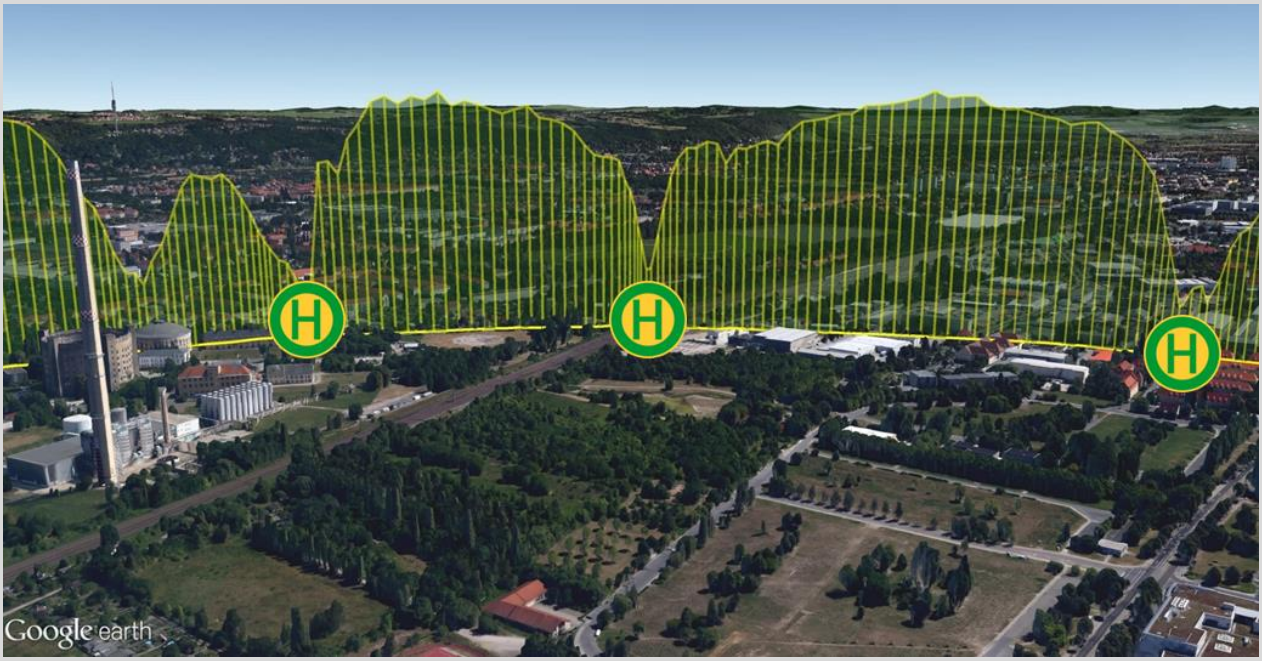


Abbildung 3: Grafische Auswertung einer Fahrtverlaufsanalyse[1]

2.2.3 Streckenanalyse

Bei der Streckenanalyse werden die für die Umsetzbarkeit elektrischer Technologiekonzepte relevanten qualitativen Liniencharakteristiken analysiert und ausgewertet. Hierzu zählen beispielsweise zur Verfügung stehende Wendezeiten an den Endpunkten, mögliche Verspätungslagen, externe Störanfälligkeiten und infrastrukturelle Gegebenheiten.

Auswahl kritischer Umlauf

Auf Basis der SOLL-Fahrplandaten werden die Umläufe identifiziert, die aus energetischer Sicht die höchsten Anforderungen an den Elektrobusbetrieb stellen (Worst-Case-Betrachtung). Diese Umläufe werden als kritische Umläufe bezeichnet und sind insbesondere durch lange Umlaufzeiten, geringe Wendezeiten an den Endpunkten und hohe theoretische Verspätungslagen gekennzeichnet. Aus den als kritisch eingestuften Umläufen wird der „kritischste“ Linienumlauf ausgewählt, welcher für die weitere Untersuchung und folglich für die Auslegung der Systemkomponenten herangezogen wird.

[1] Bilquelle: Hintergrund Google Earth

Bewertung Umlauf

Die Bewertung des Umlaufs für den Elektrobuseinsatz basiert auf den Fahr- und Umlaufdaten sowie den GPS-Echtzeitdaten aus der Linienbefahrung. Auf dieser Datenbasis können linienspezifische Informationen wie Streckenlänge, Haltestellenabstände, Fahr-, Wende- und Stillstandszeiten, Gesamt- und Durchschnittsaufenthaltszeiten an Linienendpunkten, Geschwindigkeitsprofile und Linientopographie ermittelt werden. Ziel der Bewertung ist es, die SOLL-Fahrplandaten mit den IST-Werten aus den GPS-Trajektorien abzugleichen, um eine Aussage über die tatsächlichen Verspätungslagen und eventuelle Verfrühungen zu erhalten.

Die Streckenanalyse bietet somit einen detaillierten Überblick über die umlaufspezifischen Besonderheiten und stellt gleichfalls die Herausforderungen im Zuge der Integration des Elektrobussystems dar.

2.3 Konfiguration Elektrobussystem

Die Konfiguration des Elektrobussystems hinsichtlich der Systemkomponenten, der Ladestrategie, der Auslegung des Energiespeichers und der Ladeinfrastruktur ist ein iterativer Prozess, welcher in mehreren Schritten Rückkopplungen auf das bereits konfigurierte System hat.

2.3.1 Fahrzeugseitige Systemkomponenten

Die Konfiguration der fahrzeugseitigen Systemkomponenten hat einen wesentlichen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch. Hierbei sind die Vorgaben des Verkehrsunternehmens an die Fahrzeugkonfiguration zu berücksichtigen. Folgende Komponenten des Elektrobusses werden in der Untersuchung berücksichtigt:

- Antriebsart: Radnabenmotor, radnaher Motor, Zentralmotor
- Mittlere Antriebsleistung des Fahrzeugs
- Heizungsart: Hybridheizung oder vollelektrische Heizung
- Nutzungsdauer weiterer Verbraucher pro Tag (Nebenverbraucher, Klimaanlage, Hybridheizung, vollelektrische Heizung)

2.3.2 Auswahl Ladestrategie

Im Folgenden wird untersucht, ob das Fahrzeug als Overnight-Charging-Batteriebus (Volllader) oder Opportunity-Charging-Batteriebus (Gelegenheitslader) auszulegen ist. Bei einem Volllader erfolgt die Ladung über Nacht im Betriebshof. In diesem Fall muss der Energiespeicher den Energiebedarf für einen kompletten Tageseinsatz bereitstellen. Existiert hingegen ein geeigneter Ladepunkt auf der Strecke, so kann der Elektrobus als Gelegenheitslader ausgelegt werden. Das bedeutet, dass der fahrzeugseitige Energiespeicher kleiner dimensioniert werden kann. Eine spezielle Konfiguration ist der Volllader mit Zwischenladung. Von dieser Ladestrategie wird gesprochen, wenn der Elektrobus zwar prinzipiell als Volllader ausgelegt ist, Zwischenladungen, bspw. durch längere Pausen im Betriebshof oder an den Wendepunkten, mit geringer Ladeleistung über das Plug-In-Ladesystem möglich sind (vgl. Kapitel 3.3).

Die Auswahl der Ladestrategie basiert u.a. auf folgenden Faktoren:

- Tagesfahrleistung und Besetzungsgrad
- SORT-Einstufung (verkehrliche Parameter: Stopps je Kilometer, Haltezeitanteil an Fahrzeit, Durchschnittsgeschwindigkeit)
- TOPO-Einstufung (Höhendifferenz, Steigung/Gefälle)
- Summe der Wendezeiten, Anteil der Wendezeiten an der Fahrzeit, Wendezeit je Stopp, mittlere Verspätungslage

2.3.3 Auslegung Energiespeicher

Energiespeichertechnologie

Anhand der ermittelten Energie- und Leistungsparameter wird eine geeignete Energiespeichertechnologie ausgewählt. Die entsprechenden Leistungskennzahlen werden in die Untersuchung integriert, insbesondere:

- Auslegungsgröße (nominal, d. h. die physische Speichergröße)
- State of Charge (SOC) ist ein Kennwert für den Ladezustand von Energiespeichern. Der SOC-Wert kennzeichnet die noch verfügbare Kapazität eines Energiespeichers im Verhältnis zum Nominalwert. Der nutzbare Energieinhalt (= errechneter Energiebedarf), bestimmt sich durch:
  - Zulässiger Höchstladestand (SOC_{max}) und
  - Zulässige maximale Entladetiefe (SOC_{min}).

Der Nominalwert gibt die prinzipiell verfügbare Energiemenge eines Energiespeichers an. Da diese aus den unterschiedlichsten chemisch-physikalischen Gründen – einer davon ist der gesteuerte Alterungsprozess des Energiespeichers – nie vollständig genutzt wird, werden minimale (SOC_{min}) und maximale (SOC_{max}) Grenzen der Entladung und Ladung des Energiespeichers definiert.

Ein weiterer Einflussfaktor bei der Auslegung des Energiespeichers ist dessen zyklische und kalendarische Alterung. Mit steigender Anzahl von Ladezyklen und zunehmendem Betriebsalter reduziert sich die Kapazität von Energiespeichern kontinuierlich. Diese kontinuierliche Abnahme des Energieinhalts wird von BeSystO berücksichtigt.

Energiebilanz des kritischen Umlaufs

Der Energieverbrauch des Elektrobusses auf dem kritischen Umlauf wird für einen kompletten Betriebstag simuliert. Abbildung 4 zeigt exemplarisch den Ladezustandsverlauf (SOC-Diagramm) eines Umlaufs im SOLL-Fahrplan. Man erkennt die Abgrenzung des technisch nutzbaren Energieinhaltes, markiert durch die SOC_{max}-Linie(grau) und die SOC_{min}-Linie(rot). Die blaue Linie markiert zusätzlich eine betriebliche Mindestreserve zum sicheren Erreichen des Betriebshofes aus dem Einsatzgebiet.

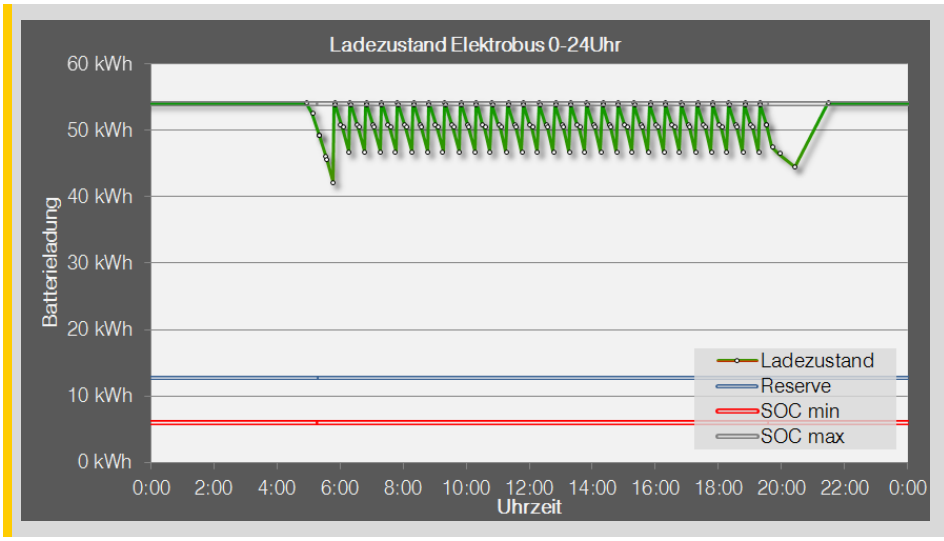


Abbildung 4: Simulation des Energieverbrauchs SOLL-Fahrplan

Das obige Beispiel zeigt die Ladestrategie Opportunity-Charging (Gelegenheitslader) mit Nachladung am Linienendpunkt für den SOLL-Fahrplan. Nach Betriebsschluss erfolgt die Nachladung im Betriebshof (Overnight-Charging). In diesem Beispiel ist bereits gegen 23.00 Uhr der SOC_{max}-Wert wieder erreicht, so dass das Fahrzeug um 6.00 Uhr mit vollem Energiespeicher ausrücken kann.

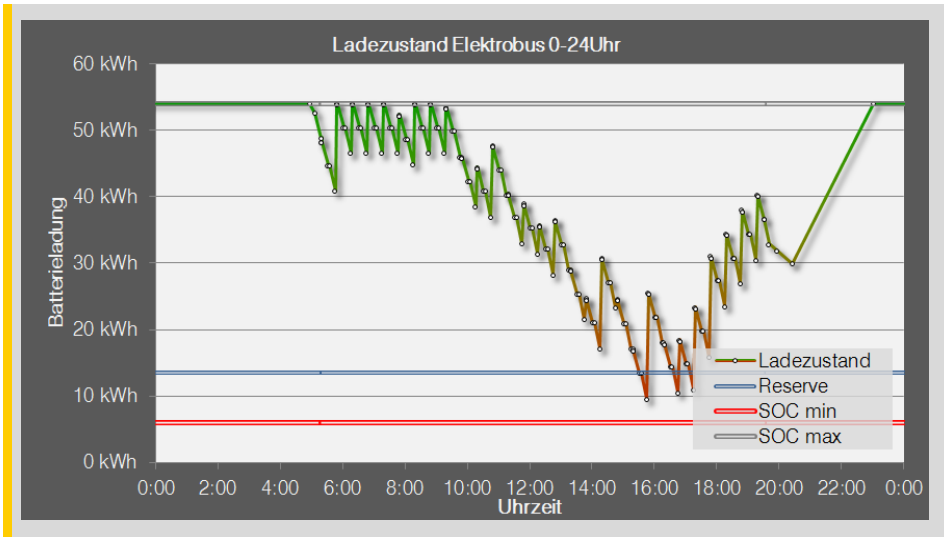


Abbildung 5: Simulation des Energieverbrauchs IST-Fahrplan

In Abbildung 5 ist beispielhaft der tatsächliche Ladezustandsverlauf im real gemessenen IST-Fahrplan abgebildet. Im Vergleich zu den theoretischen Umlaufdaten aus dem SOLL-Fahrplan (Abbildung 4) wird ersichtlich, wie sich die Verspätungslage am Linienendpunkt (Ladepunkt) und

den zu geringen Verspätungspuffern in den SOLL-Daten auswirkt. Es treten geringere Ladezeiten auf, mit der Folge, dass der Energiespeicher in der Realität schneller entladen wird als im theoretisch prognostizierten Fahrtverlauf. Daher ist die Verwendung realer Betriebsdaten entscheidend für den Erfolg des Prognosemodells.

2.3.4 Auslegung Ladeinfrastruktur

Im Zuge der Systemauslegung sind die für die Durchführung des Linienbetriebs notwendigen Ladepunkte auf der Strecke und im Betriebshof zu bestimmen. Dafür ist jeweils das geeignete Ladesystem für den Einsatz auf der Strecke und für die Betriebspause auf dem Betriebshof zu konfigurieren und auszulegen. Im Ergebnis liegen Angaben über die Energiezuführungstechnik, die Art des gewählten Ladesystems, die maximale Ladeleistung sowie über die erforderliche Anschlussleistung vor.

2.4 Ökonomische Betrachtung

Für die wirtschaftliche Betrachtung der zu untersuchenden Linie wird eine betriebswirtschaftliche Gesamtkostenbetrachtung (TCO = Total Cost of Ownership) durchgeführt.

Grundlage für die Gesamtkostenbetrachtung stellt zunächst die in der technisch-betrieblichen Bewertung ermittelte technische Vorzugsvariante des Elektrobussystems dar.

Im Zuge der Sensitivitätsbetrachtung wird untersucht, ob die Änderung einzelner Elemente im Rahmen des technisch Machbaren zu signifikant positiven Effekten bei der Wirtschaftlichkeit führen würde.

Die Kostenbetrachtung wird auf Basis der Kapitalwertmethode durchgeführt. Es fließen sämtliche Investitionskosten (Fahrzeug, Traktionskomponenten, Energiespeicher, Ladeinfrastruktur, Anschlussherstellung an das örtliche Energienetz) und die erforderliche Erneuerung der Energiespeicher in bestimmten Intervallen unter Berücksichtigung der Kosten für die 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 laufleistungsbezogen.

Des Weiteren sind in BeSystO fünf verschiedenen Berechnungsszenarien integriert. Diese Szenarien repräsentieren unterschiedliche Prognosen bei den Kostenentwicklungen für Elektro- und Diesel- bzw. Erdgasreferenzbusse:

- Best-Case: geringe Kostenentwicklung beim E-Bus und hohe Kostenentwicklung beim Referenzbus
- Middle-Case–a: geringe Kostenentwicklung beim E-Bus und geringe Kostenentwicklung beim Referenzbus
- Middle-Case–b: mittlere Kostenentwicklung beim E-Bus und mittlere Kostenentwicklung beim Referenzbus
- Middle-Case–c: hohe Kostenentwicklung beim E-Bus und hohe Kostenentwicklung beim Referenzbus
- Worst-Case: hohe Kostenentwicklung beim E-Bus und geringe Kostenentwicklung beim Referenzbus

Die TCO-Betrachtung berücksichtigt die Einbeziehung verschiedener Förderszenarien. Dabei lassen sich verfügbare oder in Aussicht stehende Fördermittel integrieren, wie beispielsweise die prozentuale Förderung auf den Mehrkostenanteil Elektrobus und auf die Errichtung von Ladeinfrastruktur.

2.5 Ökologische Betrachtung

Ein zentrales Motiv für Untersuchungen zur Umstellung von fossil betriebenen Bussystemen auf Elektrobussysteme sind ökologische Effekte.

BeSystO liefert eine laufleistungsbezogene CO_2-Äquivalent-Bilanzierung als Vergleichsdarstellung zwischen einem konventionell angetriebenem Referenzbus und einem mit dem aktuellen deutschen Strommix geladenen Elektrobus (laut DIN EN 16258-2013).

Der Wert des CO_2-Äquivalents (CO_2-e), auch relatives Treibhausgaspotential genannt (engl. GWP – Global Warming Potential), bietet einen Vergleichswert auf Basis des Treibhauseffektes von CO_2 und fasst dabei die Treibhausgaswirkung aller chemischen Verbindungen zusammen, welche einen Beitrag zur globalen Erwärmung liefern. Neben CO_2 sind dies bspw. Stickoxide (NO_x), Feinstaubpartikel (PM), Kohlenmonoxide (CO) oder Kohlenwasserstoffe (HC).

Die Energieverbräuche werden prinzipiell in folgende Wirkungsketten unterschieden:

- Well-to-Tank (Energieprozesse): Erfassung von Energieverbrauch bzw. allen indirekten Emissionen der Kraftstoffbereitstellung von der Quelle bis zum Fahrzeugtank. Der Energieverbrauch umfasst auch die Verluste bei der Herstellung und dem Transport der Energieträger z. B. in Hochspannungsleitungen.
- Tank-to-Wheel (Fahrzeugprozesse): Erfassung des Energieverbrauchs und aller direkten Emissionen des Fahrzeugbetriebes. Beim Verbrauch wird vom Endenergieverbrauch gesprochen.
- Well-to-Wheel (Fahrzeug- und Energieprozesse): Summe aus Well-to-Tank und Tank-to-Wheel, also aus direkten und indirekten Emissionen. Beim Verbrauch wird von Primärenergieverbrauch gesprochen, der neben dem Endenergieverbrauch alle Verluste aus der Vorkette mit einschließt.

Die Basis der ökologischen Betrachtungen in BeSystO bilden der Energieverbrauch und die Menge an CO_2-e auf Grundlage der DIN EN 16258-2013 sowie die Kosten der CO_2-e-Ausstöße nach standardisierter Bewertung. Die Energieketten des Referenzbusses und des Elektrobusses werden für den ausgewählten Umlauf auf Grundlage der ermittelten Energiewerte verglichen.

Das Ergebnis der ökologischen Betrachtung bietet somit verbrauchs- und fahrleistungsbezogene Emissionswerte aller Wirkungsketten, welche eine Vergleichbarkeit zwischen dem Einsatzfall Elektrobus und Referenzfahrzeug einerseits sowie eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Verkehrsunternehmen andererseits garantieren.

3 Stand der Technik

Die Elektromobilität ist aktuell eines der sich am dynamischsten weiterentwickelnden Innovationsthemen – nicht zuletzt dank des Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung und der damit einhergehenden Förderprogramme. In allen Verkehrssegmenten wurden in den zurückliegenden Jahren erhebliche Fortschritte erzielt. Galten etwa vor fünf Jahren rein elektrisch betriebene Busse noch als experimentelle Gedankenspiele mit fraglicher Tauglichkeit für den realen Linieneinsatz, so gibt es heute bereits zahlreiche kommerziell produzierte Modelle, die sich im ÖPNV-Alltag bewähren.

Demzufolge wird in diesem Kapitel eine Übersicht über verschiedene Elektrobussystemkomponenten (Elektrobus, Ladeinfrastruktur, Energiespeicher) für den Einsatz in Sachsen-Anhalt erarbeitet und entsprechende Anschaffungskosten ermittelt. Experteneinschätzungen zu Wirtschaftlichkeit, Nachrüstmöglichkeit/Ausbaufähigkeit, Reichweite, Ladezeiten, Lademöglichkeiten, Lebensdauer, Wartung vervollständigen die Betrachtung und werden, soweit aktuelle Daten vorliegen, durch Evaluationswerte belegt.

Elektrische Antriebskonzepte, Ladestrategien und Möglichkeiten der elektrischen Energiezuführung werden für den geplanten Elektrobuseinsatz in Sachsen-Anhalt analysiert und einer grundsätzlichen Bewertung hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit unterzogen.

Für die Bearbeitung der Machbarkeitsstudie werden folgende Fahrzeugtypen einbezogen:

- Minibus (6,0 - 8,0 m),
- Midibus (8,0 - 10,0 m),
- Standardbus (10,0 - 13,5 m),
- 3-Achs-Standardbus (13,5 - 15,0 m),
- Gelenkbus (18,0 - 18,75 m),
- 4-Achs-Gelenkbus (19,0 - 21,0 m),
- Doppelgelenkbus (21,0 - 24,8 m),
- Buszug (21,0 - 25,7 m).

3.1 Elektrische Busse

3.1.1 Nomenklatur

Als Elektrobusse werden im Folgenden straßengebundene Fahrzeuge des ÖPNV bezeichnet, die über einen elektrischen Hauptantrieb verfügen. Entsprechend des Antriebskonzeptes wird zwischen folgenden Elektrobustypen unterschieden:

- Battery Electric Vehicles (BEV)
- Plug-In-Hybrid Electric Vehicle (PHEV) und
- Range Extended Electric Vehicle (REEV).

Die dazugehörigen Batteriebusse mit Brennstoffzellen (Fuel Cell Bus) sowie die Wasserstoff-Hybridbusse (Fuel Cell Hybrid Bus) sind kein Bestandteil der Untersuchung.

Entsprechend dem gegenwärtigen Diskurs zur Elektromobilität werden im Folgenden die Begriffe „Batterie“ und „Akkumulator“ synonym verwendet. Die Bezeichnung von wieder aufladbaren Energiespeichern als „Batterie“ oder „SuperCap“ im Falle von Hochleistungskondensatoren hat sich trotz der gewissen begrifflichen Unschärfe als Konsens auch im wissenschaftlichen Umfeld etabliert. Energiespeichersysteme, die aus einer Kombination von Batterie und SuperCap bestehen, werden in diesem Kontext als „Kombispeicher“ bezeichnet.

3.1.2 Elektrische Antriebskonzepte

Battery Electric Vehicles (BEV)

„Battery Electric Vehicles“ sind batteriebetriebene Elektrofahrzeuge, die ausschließlich mit einem Elektromotor ausgestattet sind und ihre Energie aus einer Batterie (Energiespeicher) im Fahrzeug beziehen. Die Aufladung dieses Energiespeichers erfolgt über das Stromnetz bzw. fahrzeugintern über zurückgewonnene Bremsenergie (Rekuperation). Im deutschen Sprachraum wird der Begriff „Batteriebusse“ als Synonym für „Battery Electric Vehicles“ verwendet.

Plug-in-Hybrid Electric Vehicle (PHEV)

Ein Hybridfahrzeug ist mit mehreren Antriebssystemen ausgestattet, d. h. es werden elektrische und konventionelle Antriebs- und Energiesysteme in einem Fahrzeug vereint. Der Hybridbus ist sowohl mit einem Verbrennungsmotor, als auch mit einem Elektromotor ausgestattet. Wird ein Energiespeicher verwendet, der über Rekuperationsenergie sowie über das Stromnetz aufgeladen werden kann, spricht man von einem Plug-In-Hybrid Electric Vehicle, also einem PHEV. Nur diese am Stromnetz aufladbare PHEV‘s zählen zu den Elektrofahrzeugen.

Range Extended Electric Vehicle (REEV)

Da Batterien mit großer Kapazität zurzeit noch relativ teuer sind, statten einige Hersteller reine Elektrofahrzeuge zusätzlich mit einem Range Extender (RE) aus, der die Reichweite verlängert. Der Range Extender ist ein kleiner Verbrennungsmotor der als Generator fungiert und nur dann in Betrieb geht, wenn Leistungsspitzen oder Nachladeenergie benötigt werden. Als Range Extender kann auch eine Brennstoffzelle zum Einsatz kommen. Der Range Extender liefert zusätzlichen Strom für den Energiespeicher bzw. für die Nebenverbraucher, treibt das Fahrzeug jedoch nicht direkt an.

In Abbildung 6 sind die verschiedenen Konfigurationsmöglichkeiten für den Elektrobus aufgezeigt.

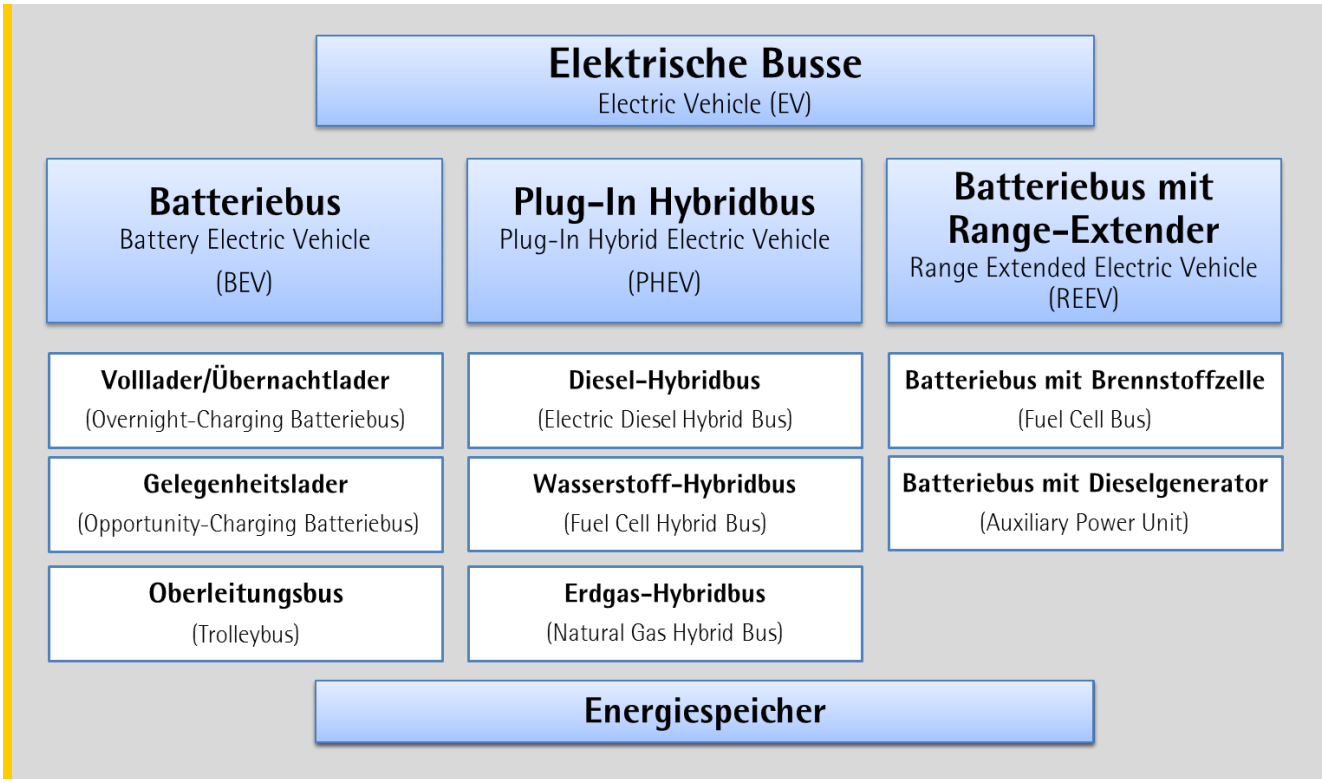


Abbildung 6: Konfigurationsmöglichkeiten für den Elektrobus

3.2 Energiespeicher

Energiespeicher sind hochkomplexe Bauteile, die heutzutage in vielen technischen Geräten verwendet werden. Obwohl sie enorme Leistungen scheinbar problemlos erbringen, sind ihre Anwendungsgebiete an bestimmte Randbedingungen geknüpft. Das „Einsatzszenario Elektrobus“ sowie die verwendete Ladestrategie haben wesentlichen Einfluss auf die Art und den Typ des zu verwendenden Energiespeichers. Gerade die punktuell hohen Leistungsaufnahmen der Traktionsenergie für Elektrobusse stellen enorme Anforderungen an den Energiespeicher.

Typ des Energiespeichers

Prinzipiell werden Energiespeicher hinsichtlich ihres Typs in Hochleistungsbatterien und Hochenergiebatterien unterschieden.

Hochleistungsbatterien sind dadurch gekennzeichnet, dass sie bei der Nachladung innerhalb einer verhältnismäßig kurzen Zeitspanne eine vergleichsweise hohe Energiemenge aufnehmen können, ohne dass der Energiespeicher dabei überproportional altert. Dieser Typ des Energiespeichers ist daher besonders für den Einsatz von Elektrobussen in Verbindung mit der Ladestrategie des Opportunity-Charging geeignet. Aufgrund der erhöhten Anforderungen ist der Durchschnittspreis je Kilowattstunde bis zu 50 % teurer als bei einer Hochenergiebatterie.

Hochenergiebatterien eignen sich besonders für den Einsatz von Elektrobussen mit der Ladestrategie des Overnight-Charging. Im Vergleich zum Opportunity-Charging werden sie mit einer moderaten Ladeleistung über eine längere Dauer geladen, um eine überproportionale Alterung zu vermeiden. Daher ist dieser Typ des Energiespeichers preislich günstiger als eine Hochleistungsbatterie.

Arten des Energiespeichers

Die zum Einsatz kommenden chemischen Zusammensetzungen von Energiespeichern unterliegen fortwährenden Verbesserungen durch einen stetigen Forschungs- und Entwicklungsprozess.

Für den Einsatz von Elektrobussen werden derzeit vorwiegend Energiespeicher zweier unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen verwendet. Einerseits sind dies der Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO) und andererseits der Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator (LiFePO4). Beide Arten des Energiespeichers können als Hochleistungsbatterie bzw. als Hochenergiebatterie gefertigt werden.

Entwicklungstrends

Die Analysen zur Ressourcenverfügbarkeit von Rohstoffen für Energiespeicher des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) machen deutlich, dass sekundäres Material aus

Energiespeichern erst ab 2030 eine zunehmend bedeutende Rolle bei der globalen und europäischen Versorgung spielen. Der überwiegende Anteil des kontinuierlich steigenden Bedarfs wird auch danach sowohl für das moderate, als auch für das optimistische Szenario durch den Primärrohstoff gedeckt werden. Selbst bei einer starken Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen (optimistisches Szenario) sind die geologischen Reserven von Lithium ausreichend, um den hohen Rohstoffbedarf zu decken. (Quelle: BMUB-2011)

Bei der Kostenenentwicklung von Energiespeichern lässt sich der deutliche Trend einer Kostenreduzierung im PKW-Bereich auf den Elektrobus-Bereich übertragen. Die Kosten je kWh werden aber weiterhin deutlich über den Kosten für Energiespeicher in PKW- Anwendungen liegen.

Unter Betrachtung der sinkenden Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe wie Erdöl und Erdgas, ist davon auszugehen, dass mit steigender Rohstoffknappheit weiterhin die Rohstoffpreise steigen werden. Dieser Trend führt in einem ersten Schritt zur Erhöhung der Betriebskosten konventioneller Bussysteme und fördert damit indirekt die Entwicklung und den Umstieg auf alternative Antriebskonzepte.

3.3 Ladeinfrastruktur

3.3.1 Möglichkeiten der elektrischen Energiezuführung

Die Möglichkeiten der elektrischen Energiezuführung zum Nachladen von Elektrobussen werden nachfolgend in Abbildung 7 dargestellt. Folgende Technologien werden für den Einsatz in Sachsen-Anhalt erläutert, bewertet und einander gegenübergestellt:

- Konduktiv-dynamische Energiezuführung (z. B. Oberleitung),
- Konduktiv-stationäre Energiezuführung (z. B. Docking-System, Plug-In-System)
- Induktiv-stationäre Energiezuführung (Induktionsschleife/Pick-Up).

Unter einer konduktiven Energiezuführung wird dabei ein leitungsverbundenes Laden über eine form- oder kraftschlüssige Verbindung verstanden.

Der Begriff der induktiven Energiezuführung bezeichnet das kontaktlose Laden unter Nutzung elektromagnetischer Felder, also ohne direkte Kontaktierung.

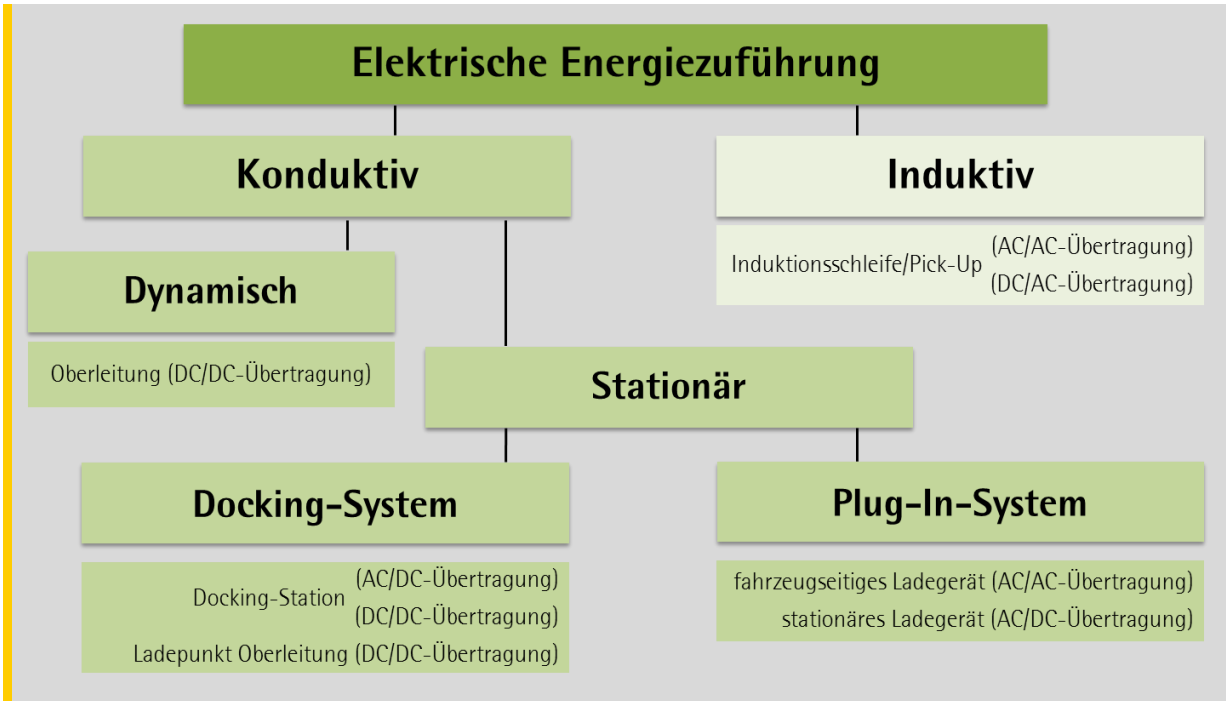


Abbildung 7: Möglichkeiten der elektrischen Energiezuführung

Unter der konduktiv-dynamischem Energiezuführung ist das leitungsgebundene Laden während der Fahrt zu verstehen. Das Energieübertragungssystem entspricht der Funktionsweise eines Oberleitungsbusses.

Bei der konduktiv-stationären Energiezuführung erfolgt die Stromübertragung zwischen einer ortsfesten Ladestelle und dem Elektrobus über eine kraftschlüssige elektrische Verbindung.

Es wird dabei zwischen folgenden Ladesystemen unterschieden:

- Docking-System
  - Docking-Station
  - Ladepunkt Oberleitung
- Plug-In-System
  - Fahrzeugseitiges Ladegerät
  - Stationäres Ladegerät

Als induktives Laden wird das kontaktlose Laden, also das Laden ohne direkte Kontaktierung unter Nutzung elektromagnetischer Felder bezeichnet.

Grundsätzlich werden Energiespeicher mit Gleichspannung nachgeladen. Wird der Ladestrom aus einer Wechselstrom-Quelle (AC) bezogen, ist dieser für das Laden der Speicher in Gleichstrom (DC) zu wandeln. Die verschiedenen Untergruppen der Energiezuführung (z. B. AC-, AC/DC-, DC-Ladung) sind in der Analyse berücksichtigt.

Bei allen dezentral versorgten Energiesystemen, unabhängig ob konduktiv oder induktiv, sind Umfang und Dauer des Nachladens abhängig von:

- den Abständen zwischen den einzelnen Ladestationen,
- der Verweildauer an der Ladestation,
- der Höhe des Ladestromes,
- der Größe des Energiespeichers,
- der Energiedichte des Energiespeichers,
- der Entladungstiefe des Energiespeichers,
- dem Alter des Energiespeichers und
- der Außentemperatur.

Bei der Systementscheidung sind die genannten Faktoren im Kontext mit den betrieblichen Anforderungen des jeweiligen Einsatzszenarios zu bewerten. Die Entscheidung über die Nachladestrategie hat erhebliche Konsequenzen für die Wirtschaftlichkeit des Systems in Verbindung mit der Attraktivität der Verkehrsdurchführung und der Einsatzstabilität.

3.3.2 Oberleitung (konduktiv-dynamisch)

Unter der konduktiv-dynamischem Energiezuführung ist leitungsgebundenes Laden während der Fahrt zu verstehen. Das Energieübertragungssystem entspricht der Funktionsweise eines Oberleitungsbusses (O-Bus). Der Strom wird über die Fahrleitung (Oberleitung) als Energiequelle durch die fahrzeugseitigen Stromabnehmer (Pantograph) übertragen (vgl. Abbildung 8). Für die Stromabnahme werden zwei Fahrdrähte (+/-) benötigt.

Die betrachteten Elektrobusse beziehen ihre Energie zum Nachladen des Energiespeichers aus der abschnittsweise installierten Oberleitung. Während der Fahrt unter der Oberleitung gelten diese Fahrzeuge nicht als Batteriebusse, sondern als Oberleitungsbusse.

Dachgeräte | Pantograph angedrahtet

Abbildung 8: Stromabnehmer bei Oberleitungsbussen[2]

[2] Bildquelle: VCDB

3.3.3 Docking-Station (konduktiv-stationär)

Konduktiv-stationäre Energiezuführungssysteme dienen ausschließlich dem Laden der Energiespeicher im Fahrzeugstillstand. Dazu können große Energiemengen zwischen wegseitiger Ladeeinrichtung und fahrzeugseitigem Energiespeichersystem übertragen werden.

Bei konduktiv-stationärer Energiezuführung mittels Docking-Station wird der fahrzeugseitige Energiespeicher an punktuell im Linienverlauf installierten Ladestationen nachgeladen. Das Nachladen erfolgt auf der Strecke während planmäßiger Fahrzeugstopps an Wendepunkten und / oder Haltestellen (Opportunity-Charging).

Im Weiteren wird der Begriff „Docking-Station“ als Synonym für konduktiv-stationäre Energiezuführungssysteme verwendet (Abbildung 9). Es wird zwischen folgenden Ausführungsvarianten unterschieden:

- Hub-Docking-Station (Stromabnehmer zur Kontaktherstellung auf dem Fahrzeugdach)
- Seiten-Docking-Station (Stromabnehmer zur Kontaktherstellung an der Ladestation, Kontaktherstellung auf der Fahrzeugseite)
- Senk-Docking-Station (Stromabnehmer zur Kontaktherstellung an der Ladestation)

Hub-Docking-Station
im Projekt SEB Dresden

Seiten-Docking-Station
im Projekt SEB Münster

Senk-Docking-Station
im Projekt Hamburg

Abbildung 9: Docking-Station-Systeme[3]

Das Spannungs- und Leistungsniveau ist nicht vorgegeben und richtet sich nach dem jeweiligen Anwendungsfall. Im Allgemeinen liegen die Parameter jedoch im Bereich von 600 bis 900 V Spannung und mehreren hundert Kilowatt Ladeleistung.

[3] Bildquellen (v. l. n. r.): Fraunhofer IVI, VCDB, Wikipedia/Creative Commons

3.3.4 Ladepunkt Oberleitung (konduktiv-stationär)

Bei einer DC-Ladung wird der Ladestrom direkt von einer Gleichstrom-Quelle in das Fahrzeug übertragen. Dies erfolgt über die Einbindung der Straßenbahnunterwerke bzw. über einen Abzweig von der Straßenbahnfahrleitung mittels Mast-Trennschalter. Physisch wird die Ladestation als Oberleitung mit zwei Fahrleitungen für +/- ausgeführt.

Um die thermische Belastung der mit hohen Strömen beanspruchten Komponenten zu begrenzen (etwa Überhitzungen der Fahrleitung und des Kontaktsystems am Fahrzeug) wird der Ladestrom begrenzt. In einem Anwendungsfall in Wien wurde der Ladestrom für das Laden der Busse an der Haltestelle beispielsweise auf 90 A beschränkt.

Bei der DC-Ladung ist kein infrastrukturseitiges Ladegerät erforderlich, stattdessen ist im Fahrzeug ein zusätzlicher Umformer verbaut. Da bei der zweipoligen DC-Ladung kein Schutzkontakt vorhanden ist, muss das Fahrzeug, wie bei Oberleitungsbussen üblich, doppelt isoliert werden.

Die Stromübertragung zwischen Fahrleitung und Fahrzeug erfolgt über einen adaptierten Stromabnehmer, nach Straßenbahn-Baumuster. Zur Minimierung des Gefährdungspotentials, wurde der Stromabnehmer mit einer zusätzlichen Erdung ausgestattet (vgl. Abbildung 10).

Abbildung 10: Stromabnehmer von Schunk[4]

Bei diesem Stromabnehmer sind die Kontakte (Positiv, Negativ, Erdung) voneinander isoliert. Ein Control-Pilot, der die richtige Reihenfolge der Kontaktherstellung überwacht, ist hier nicht vorhanden. Durch den Einsatz von Fahrleitungsschienen, ist es möglich, die Ladeleistung zu erhöhen, da diese höheren Belastungen standhalten.

[4] Bildquelle: VCDB

3.3.5 Fahrzeugseitiges Ladegerät (Plug-In-System)

Bei der AC-Ladung befindet sich das Ladegerät als Kopplung zwischen Netzanschluss und fahrzeugseitigem Energiespeicher im Fahrzeug. Über das Ladekabel wird ein infrastrukturunabhängiger Netzzugang gewährleistet.

Zum konduktiven Laden des Energiespeichers eines Elektrofahrzeuges wurden durch die International Electrotechnical Commission in der Norm IEC 62196 die Lademodi AC/AC-Ladung inklusive der zugehörigen Steckverbinder definiert:

Mode 1 (1~ AC)

Mode 1 beschreibt das Laden unter Nutzung einer konventionellen, einphasigen 230-V-AC-Haushaltssteckdose (Schuko/CEE). Diese Anschlüsse sind im Allgemeinen mit 16 A abgesichert und stellen so eine maximale Ladeleistung von rund 3,7 kW zur Verfügung. Dieser Mode stellt nach vorherrschender Meinung selbst für den PKW-Bereich nur eine Notlösung dar, da zum einen die Ladezeiten sehr hoch und die Ladewirkungsgrade sehr niedrig (50-80 %) sind. Für den ÖPNV ist er vollends ungeeignet.

Mode 2 (1~ AC und 3~ AC)

Bei Mode 2 unterteilt sich das Laden in das einphasige Laden an der Haushaltssteckdose mit 3,7 kW, wie in Mode 1, allerdings mit eigener Absicherung und Kommunikation (ICCB), und das 3-phasige Laden am CEE-Anschluss mit 32 A und 22 kW. Wie bei Mode 1 ist auch hier das Ladegerät mobil im Fahrzeug verbaut. Die Verbindung erfolgt durch ein Ladekabel AC Anschluss (vgl. Abbildung 11).

Abbildung 11: Ladekabel AC-Ladung (Mode 2)[5]

[5] Bildquelle: http://www.emfm.de/ladestationen/ladekabel/

Mode 3 (3~ AC)

Mode-3-Laden beschreibt das Wechselstromladen an Ladesäulen, bei denen Kommunikations- und Schutzmodule fest integriert sind. Es wird weiterhin ein fahrzeugseitiges Ladegerät genutzt. Der Ladestrom ist auf 63 A begrenzt, es ergibt sich eine Ladeleistung von 44 kW (vgl. Abbildung 12.

Abbildung 12: Ladekabel AC-Ladung (Mode 3)[6]

[6] Bildquelle: http://www.emfm.de/ladestationen/ladekabel/

3.3.6 Stationäres Ladegerät (Plug-In-System)

Durch die International Electrotechnical Commission sind in der Norm IEC 62196 ebenfalls die Lademodi für AC/DC Ladung inklusive der zugehörigen Steckverbinder definiert:

Mode 4 (DC)

Mode 4 definiert das Laden mit Gleichstrom. Dieser wird von stationär installierten Gleichrichtern bereitgestellt, ein Ladegerät im Fahrzeug ist nicht notwendig. Die genaue Ladespannung hängt von der zulässigen Spannung des zu ladenden Energiespeichers und den an die Ladesäule übermittelten Zustandsdaten (z. B. SOC) ab und liegt damit üblicherweise im Bereich von etwa 400-800 V. Es gibt zwei Varianten:

- Bei DC-low wird fahrzeugseitig eine Typ-2-Kabelverbindung genutzt; die maximale Ladeleistung beträgt 38 kW.
- Die DC-high-Ladung nutzt in Europa die Ladeschnittstelle „Combo Typ 2“ (auch CCS genannt) mit zwei zusätzlichen DC-Kontakten. Die maximale Ladespannung beträgt 850 V, der maximale Ladestrom 200 A und die Maximalladeleistung ist 170 kW (vgl. Abbildung 13).

Abbildung 13: Combostecker Typ CCS 850 V[7]

Auf dem Markt erhältliche AC-Schnellladesäulen verfügen über eine Ladeleistung von bis zu 44 kW. Sie sind auf eine dreiphasige AC-Ladespannung von 400 V und einem Ladestrom von 63 A ausgelegt. In der Entwicklung befinden sich AC/DC-Ladesäulen, die eine Ladeleistung bis zu 80 kW zur Verfügung stellen können. Hierfür ist die entsprechende AC-Infrastruktur beim Betreiber anzupassen.

[7] Bildquelle: https://www.e-stations.de/wissen/e-stecker

3.3.7 Induktionsschleife/Pick-Up (induktiv-stationär)

Als induktives Laden wird das kontaktlose Laden, also das Laden ohne direkte Verbindung zum Stromnetz unter Nutzung elektromagnetischer Felder bezeichnet.

Die Energiezuführung erfolgt über einen 400-V-AC-Netzzugang. Die Ladestationen sind entlang der Strecke an ausgewählten Haltestellen, an den Endhaltestellen oder im Depot vorzusehen. Eine Energieübertragung erfolgt während der betrieblichen Halte- sowie Wartezeiten an den Ladestationen. Somit ist keine Änderung im Betriebsablauf notwendig. Die Ladestationen werden erst für den Ladevorgang frei geschaltet, sobald der Elektrobus zweifelsfrei über der Ladespule steht und diese nicht mit anderen metallischen Gegenständen belegt ist.

Bei dem induktiven Energieübertragungssystem wird der Ladestrom von einer Primärspule in der Fahrbahndecke der Haltestelle auf eine absenkbare Abnehmerspule (Pick-Up) im Fahrzeugboden des Elektrobusses übertragen. Dabei erfolgt eine Leistungsübertragung von bis zu 200 kW. Die Leistung ist abhängig von der Position des Fahrzeugs zur Primärspule und der Größe des Luftspalts zwischen der Sekundär- und Primärspule. Zur Stromübertragung ist im Fahrzeugboden eine 5 m lange, absenkbare Primärspule eingebaut (vgl. Abbildung 14).

Abbildung 14: Abnehmerspule im Fahrzeugboden (Pick-Up)[8]

[8] Bildquelle: www.verkehr-bs.de

3.3.8 Zusammenfassung

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen Systeme der elektrischen Energiezuführung.

Ladesystem	Energiebereitstellung	Bewertung
Oberleitung (konduktiv-dynamisch) DC/DC – Übertragung	▸ Unterwerke ▸ Oberleitung Straßenbahn nicht nutzbar	▸ Keine weitere Betrachtung aufgrund des hohen Planungs- und Bauaufwands sowie hoher Investitionskosten (Oberleitung)
Docking-Station (konduktiv-stationär) AC/DC – Übertragung / DC/DC – Übertragung	▸ Unterwerke ▸ Oberleitungsanbindung Straßenbahn (mit erhöhten Zusatzkosten) und Kabeltrasse	▸ Bevorzugtes Ladesystem auf der Strecke ▸▸ Insbesondere beim Einsatz von mehreren Batteriebussen auf einer Linie ▸▸ Kapazität des Energiespeichers kann minimiert werden ▸ Ladesystem wird in die Untersuchung mit einbezogen
Ladepunkt Oberleitung (konduktiv-stationär) DC/DC – Übertragung	▸ Unterwerke und Kabeltrasse	▸ Keine weitere Betrachtung aufgrund der Vorgabe eines einheitlichen Fahrzeugantriebskonzepts und Energiezuführungssystems für flexiblen Einsatz im gesamten Bundesland
Fahrzeugseitiges Ladegerät (Plug-In-System) AC/AC – Übertragung	▸ 230 V AC Anschluss ▸ 400 V AC Anschluss	▸ AC-Ladesystem ist für den Betrieb von Elektrobussen nicht zweckmäßig ▸▸ Fahrzeugseitige Ladegeräte können das Fahrzeuggewicht negativ beeinflussen ▸▸ Rückfallebene für Instandhaltungszwecke ▸ Keine weitere Betrachtung des Ladesystems
Stationäres Ladegerät (Plug-In-System) AC/DC – Übertragung	▸ 400 V AC-Anschluss	▸ Plug-In-System CCS ist flexibel einsetzbar für Nachladen im Betriebshof oder an Zwischenpunkten mit längeren Aufenthaltszeiten ▸▸ Kapazität des Energiespeichers und Ladeleistung in Abhängigkeit der Ladestrategie konfigurieren ▸ Ladesystem wird in die Untersuchung mit einbezogen
Induktionsschleife/Pick-Up (induktiv-stationär) AC/AC – Übertragung / DC/AC – Übertragung	▸ Unterwerk ▸ 400 V AC-Anschluss	▸ Keine weitere Betrachtung aufgrund des hohen Planungs- und Bauaufwands sowie hoher Investitionskosten (Fahrzeugkosten)

Tabelle 1: Bewertung Energiezuführungssysteme

4 Bestandsaufnahme Infrastruktur und Fahrzeuge

4.1 Übersicht Verkehrsunternehmen

Die Bestandsaufnahme von Infrastruktur und Fahrzeugen im ÖPNV in Sachsen-Anhalt erfolgte mittels einer schriftlichen Evaluation bei allen Verkehrsunternehmen mit Liniengenehmigungen. Die folgenden Verkehrsunternehmen wurden kontaktiert:

- BördeBus – BördeBus Verkehrsgesellschaft mbH*
- DVG – Dessauer Verkehrs GmbH*
- HAVAG – Hallesche Verkehrs-AG*
- HVB – Harzer Verkehrsbetriebe GmbH*
- HVG – Halberstädter Verkehrs-GmbH*
- KVG – Kreisverkehrsgesellschaft Salzland mbH
- MVB – Magdeburger Verkehrsbetriebe GmbH & Co. KG*
- NJL – Nahverkehrsgesellschaft Jerichower Land mbH*
- OBS – OBS Omnibusbetrieb Saalekreis GmbH
- Otto Müller Omnibusbetrieb GmbH und Co. KG
- PNVG – Personennahverkehrsgesellschaft Merseburg-Querfurt*
- PVG – Personenverkehrsgesellschaft Burgenlandkreis mbH*
- PVGS – Personenverkehrsgesellschaft Altmarkkreis Salzwedel mbH*
- RVB – Regionalverkehr Bitterfeld-Wolfen GmbH
- stendalbus – stendalbus Regionalverkehr Westsachsen GmbH*
- Vetter – Vetter Busunternehmen GmbH
- VGS – Verkehrsgesellschaft Südharz mbH*

Von diesen 17 Verkehrsunternehmen konnten 12 Evaluationsbögen ausgewertet werden (siehe *Markierung), was einen sehr positiven Rücklauf bedeutet, da es sich um eine freiwillige Befragung handelte.

4.2 Erhebungsdesign

Die Evaluationsbögen wurden in enger Abstimmung mit der NASA GmbH entworfen. Im Ergebnis wurde mit dem Erhebungstool BeSystO – Bestandsaufnahme Infrastruktur Fahrzeuge (BIF) die Bestandsaufnahme relevanter Infrastruktur und Fahrzeugkenndaten durchgeführt.

Das Erhebungstool gliedert sich in zwei Teilbereiche, den Evaluationsteil Fahrzeugflotte und den Evaluationsteil Infrastruktur.

Der Evaluationsteil Fahrzeugflotte besteht aus den Abfragen Fahrzeugflotte (Bestand) und Fahrzeugflotte (Beschaffung). Die Abfrage Fahrzeugflotte (Bestand) beinhaltet die Anzahl Fahrzeuge, untergliedert nach:

- Fahrzeugtypen (Mini-/Midi-/Standard-/3-Achs-Standard-/Gelenkbus/4-Achs-Gelenkbus/Buszug)
- Antriebsarten (Diesel, Gas, Diesel-Hybrid, BEV, PHEV, REEV) sowie
- Fahrzeugkennziffern (Baujahr, EURO Norm, Kraftstoffverbräuche, Laufleistungen 2015/Gesamt).

Die Abfrage Fahrzeugflotte (Beschaffung) beinhaltet die Erhebung der geplanten Erst- und Ersatzbeschaffungen von Fahrzeugen. Die Verkehrsunternehmen wurden befragt, wie viele Fahrzeuge, untergliedert nach den obigen Fahrzeugtypen und Antriebsarten, voraussichtlich in den Zeiträumen von 2016 bis 2020 und von 2021 bis 2025 beschafft werden.

Der Evaluationsteil Infrastruktur beinhaltet die Erhebung relevanter Daten bezüglich des Betriebshofs und der dort vorhandenen Diesel-, Erdgas- und E-Businfrastrukturen sowie der von den Verkehrsunternehmen geplanten oder im Bau befindlichen Businfrastruktureinrichtungen. Folgende Daten werden erhoben:

- Betriebshöfe:
  - Baujahr, Jahr der letzten Sanierung
  - Abstellkapazität (Bus, Tram)
  - Werkstattkapazität (Bus, Tram)
- Energieversorgung:
  - Tankstellen (Diesel-/Gas)
  - Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge
  - Genutzte Einrichtungen Dritter
- Geplante oder im Bau befindliche Businfrastruktureinrichtungen:
  - Art der Infrastruktureinrichtungen, Baubeginn, Investitionsvolumen

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Fahrzeugflotte im Bestand

Die Fahrzeugflotte der untersuchten Verkehrsunternehmen besteht aus 903 Fahrzeugen von insgesamt etwa 1.300 Bussen im Land Sachsen-Anhalt[9]. Von den erhobenen 903 Fahrzeugen sind über 80 % Standard- beziehungsweise 3-Achs-Standardbusse (vgl. Abbildung 15). Mini- und Midibusse haben einen Anteil von unter 10 % an der Fahrzeugflotte.

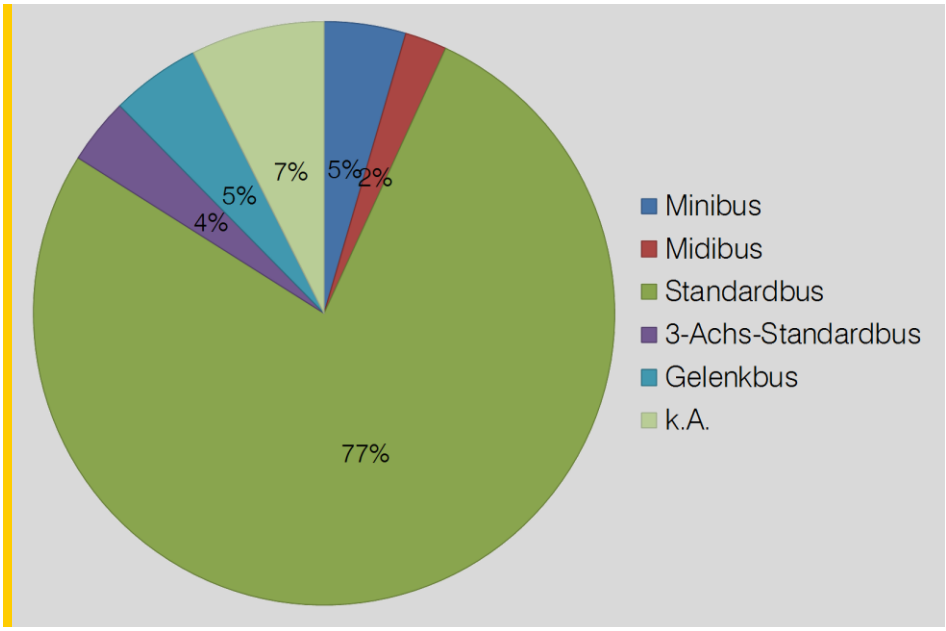


Abbildung 15: Aufteilung Fahrzeugtypen

Der Anteil von Gelenkbussen beträgt lediglich 5 %. Im Bundesdurchschnitt ist eine Erhöhung der Gelenkbusanteile, aufgrund einer gestiegenen Nachfrage von Seiten der Fahrgäste, zu verzeichnen. Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend auch in Sachsen-Anhalt abzeichnen wird.

Die erhobene Fahrzeugflotte im Linienbusbereich enthält 78 % dieselbetriebene und 22 % erdgasbetriebene Fahrzeuge (vgl. Abbildung 16). Demzufolge sind weder Hybrid- noch Elektrobusfahrzeuge in der Erhebung enthalten.

[9] Quelle: Schätzung NASA GmbH

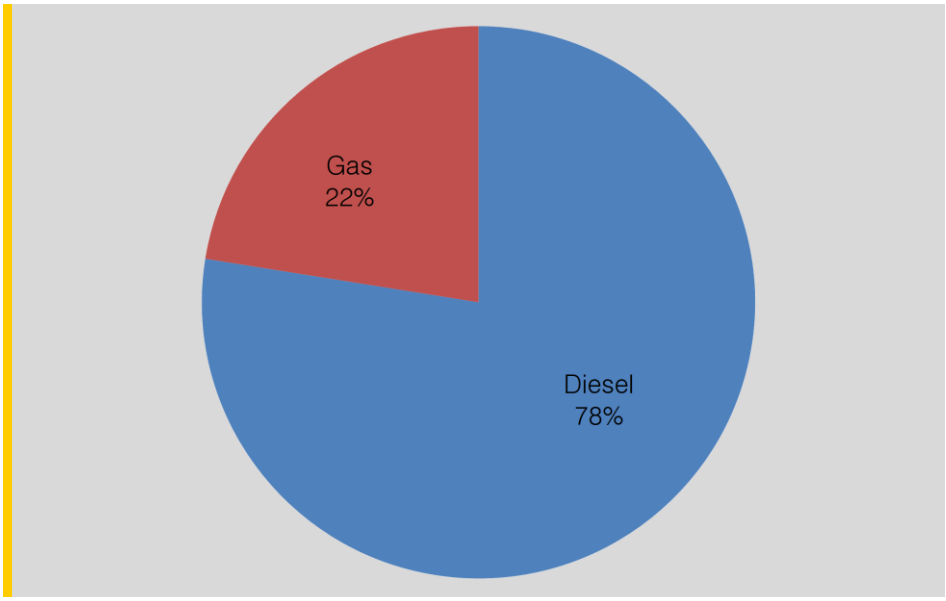


Abbildung 16: Aufteilung Antriebsarten

Das durchschnittliche Fahrzeugalter beträgt 8 Jahre. Die Verteilung des Fahrzeugflottenalters ist aus Abbildung 17 ersichtlich. Des Weiteren ist interessant, dass einige Fahrzeuge deutlich älter als 20 Jahre alt sind.

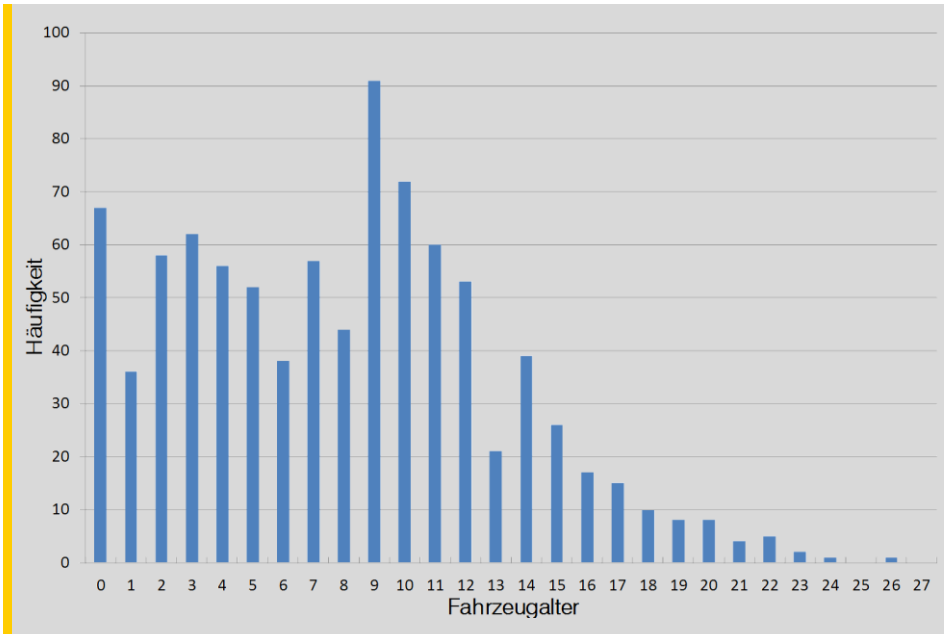


Abbildung 17: Verteilung Fahrzeugflottenalter

Die Betrachtung der EURO-Normen[10] ergibt ein differenziertes Bild der im Bezugsjahr 2015 vorhandenen Abgasnormen der gesamten Fahrzeugflotte (vgl. Abbildung 18). Etwa 2/3 aller erhobenen Fahrzeuge hat die EURO-IV bis EURO-VI-Abgasnorm. Davon stellt die EURO-V-Norm mit 34 % den höchsten Anteil dar. Zu 9 % der Fahrzeuge liegen keine Angaben bezüglich der Abgasnorm vor.

Bei dieser Betrachtung ist zu beachten, dass sich die Emissionsgrenzwerte der EURO-Normen lediglich auf die reglementierten Schadstoffe (CO, HC, NO_x, PM) beziehen und somit keine Rückschlüsse auf den CO_2-Ausstoß der Fahrzeugflotte getroffen werden können, weil die CO_2-Belastung in den einzelnen EURO-Normen nicht reglementiert wird.

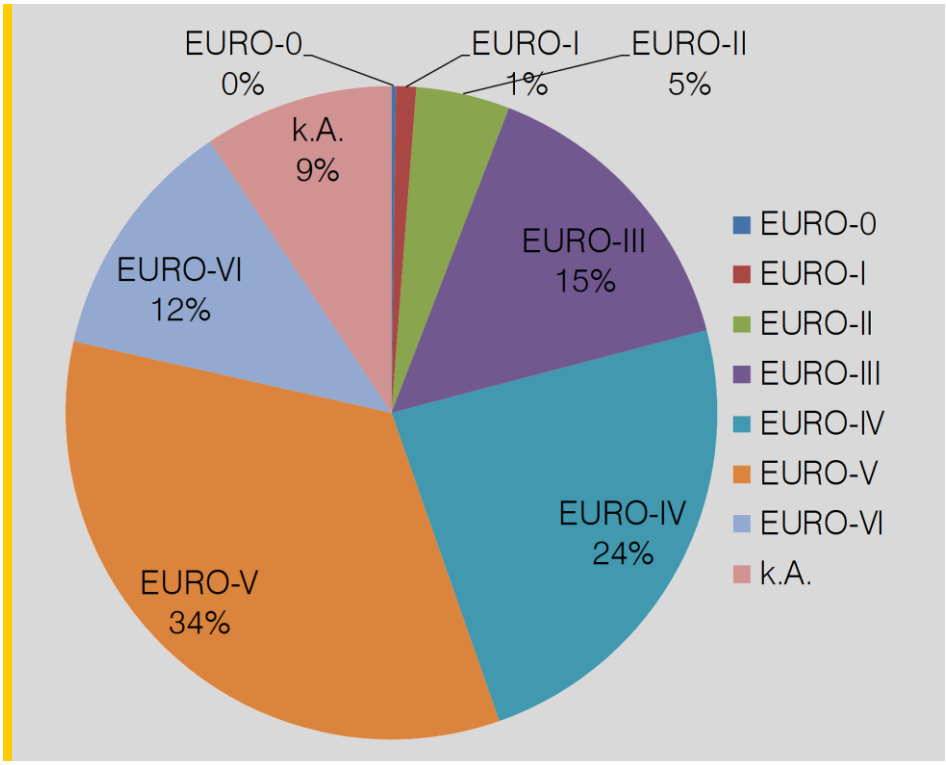


Abbildung 18: Aufteilung EURO Normen

[10] Der Abgasstandard EEV (Enhanced Environmentally Friendly Vehicle) ist ein europäischer Abgasstandard für Busse und Lkw und wird der EURO V Norm zugeordnet.

4.3.2 Geplante Erst- und Ersatzbeschaffungen

Um den zukünftigen Förderbedarf in Sachsen-Anhalt abzuschätzen, ist es erforderlich, den möglichen Investitionsbedarf zu prognostizieren. Unter dem Gesichtspunkt einer zu erwartenden stabilen Förderung und Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Elektrobussen wurden die Verkehrsunternehmen gebeten, ihre geplanten Erst- und Ersatzbeschaffungen zu benennen (vgl. Tabelle 2).

Fahrzeugtyp	Zeitraum	Diesel	Gas	Diesel Hybrid	BEV	PHEV	REEV	GESAMT
Minibus 6,0 – 8,0 m	2016-2020	13	-	-	3	-	-	16
	2021-2025	9	-	-	2	-	-	11
Midibus 8,0 – 10,0 m	2016-2020	7	-	-	-	-	-	7
	2021-2025	6	-	-	-	-	-	6
Standardbus[11] 10,0 - 13,5 m	2016-2020	217	56	-	3	-	-	278
	2021-2025	188	30	-	-	-	-	227
3-Achs-Standardbus 13,5 - 15,0 m	2016-2020	15	-	-	-	-	-	15
	2021-2025	-	-	-	-	-	-	-
Gelenkbus 18,0 - 18,75 m	2016-2020	12	-	-	-	-	-	12
	2021-2025	6	-	-	-	-	-	6
4-Achs-Gelenkbus 19,0 - 21,0 m	2016-2020	-	-	-	-	-	-	-
	2021-2025	-	-	-	-	-	-	-
Doppelgelenk-bus 21,0 – 24,8 m	2016-2020	-	-	-	-	-	-	-
	2021-2025	-	-	-	-	-	-	-
Buszug 21,0 - 25,7 m	2016-2020	-	-	-	-	-	-	-
	2021-2025	-	-	-	-	-	-	-
Summe	2016-2020	328						
	2021-2025	250						
	2016-2025	578						

Tabelle 2: Geplante Erst- und Ersatzbeschaffungen

[11] Einige Verkehrsunternehmen haben keine Antriebsart für Standardbusse angegeben sondern lediglich die gesamte Fahrzeuganzahl beziffert. Demzufolge ist der Gesamtwert höher als die Summe der einzelnen Antriebsarten.

Im Zeitraum von 2016 bis 2020 beabsichtigen die untersuchten Verkehrsunternehmen insgesamt 328 Erst- und Ersatzbeschaffungen vorzunehmen. Der Standardbus stellt mit über 80 % den klaren Favoriten unter den Fahrzeugtypen dar. Davon sind mehr als 75 % dieselgetriebene und etwa 20 % erdgasbetriebene Standardbusse. Auffällig ist, dass eine geringe Nachfrage nach Elektrobussen (BEV, PHEV und REEV) bzw. Diesel-Hybridbussen bis 2020 vorhanden ist. Lediglich 6 batteriebetriebene Standard- bzw. Kleinbusse (BEV) beabsichtigen die Verkehrsunternehmen zu beschaffen.

Dies ist vermutlich auf die noch bestehenden Unklarheiten der Verkehrsunternehmen hinsichtlich der Förderfähigkeit bzw. der Förderquote von Elektrobussen bzw. Diesel-Hybridbussen zurückzuführen und sollte sich nach dem Erscheinen der Förderrichtlinie vermutlich etwas relativieren.

Im Zeitraum von 2021 bis 2025 beabsichtigen die untersuchten Verkehrsunternehmen insgesamt 250 Erst- und Ersatzbeschaffungen. Der dieselbetriebene Standardbus stellt auch in diesem Zeitraum mit mehr als 80 % den Favoriten unter den Fahrzeugtypen dar, wobei der Anteil von erdgasbetriebenen Standardbussen im Vergleich zum Zeitraum von 2016 bis 2020 abnimmt. Auffällig ist, dass aus den oben genannten Gründen erneut keine, beziehungsweise nur eine sehr geringe Nachfrage nach Elektrobussen (BEV, PHEV und REEV) und Diesel-Hybridbussen im Zeitraum von 2021 bis 2025 vorhanden ist. Lediglich die batteriebetriebenen E-Kleinbusse (BEV) scheinen derzeit für die Verkehrsunternehmen interessant zu sein.

Diese Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit einer landesweiten Förderrichtlinie als Rahmen für die geplanten Beschaffungen der Verkehrsunternehmen. Weiterhin wurde im Zuge der Befragung ersichtlich, dass größere Unklarheiten bezüglich Technologie, Beschaffung und Betrieb von Elektrobussystemen bestehen, welche sich derzeit stark hemmend auf die Beschaffungsaktivitäten auswirken. Demzufolge wären beratende Rahmenaktivitäten im weiteren Beschaffungsprozess zielführend und sollten Bestandteil der Förderrichtlinie sein.

4.3.3 Umweltbetrachtung der Fahrzeugflotte

Das Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA)[12] ermöglicht eine standardisierte Berechnung der Treibhausgas- und Schadstoffbelastungen des Straßenverkehrs. HBEFA liefert Emissionsfaktoren aller reglementierten Schadstoffe (NO_X, CO, HC und PM) und des Treibhausgases CO_2 für Linien und Reisebusse.

Diese Emissionsfaktoren belegen das Abgasverhalten in realen Fahrsituationen, basierend auf umfangreichen Messungen und Untersuchungen der vergangenen Jahre. Demzufolge werden die tatsächlich während des Fahrbetriebes ausgestoßenen Abgase ermittelt. Dies ist gerade im Hinblick auf die Untersuchungen der letzten Jahre von Bedeutung, da sich gezeigt hat, dass die Emissionen in realen Fahrsituationen deutlich höher sein können, als es die Grenzwertgesetzgebung festlegt.

BeSystO-BIF enthält die Emissionsfaktoren der deutschen Linienbusflotte aus der aktuellen HBEFA Version. Anhand der Laufleistung der gesamten Fahrzeugflotte lassen sich somit die lokal verkehrsbedingten Emissionen für das Bezugsjahr 2015 sowie die Entwicklung für die Zeiträume 2020, 2025 und 2030 ermitteln (Szenario HBEFA). Betrachtet wird hierbei ausschließlich die Tank-to-Wheel Kette.

In Tabelle 3 ist die Entwicklung der lokalen Treibhausgas- und Schadstoffemissionen der betrachteten Linienbusflotte für die oben genannten Zeiträume ersichtlich. Basis der Berechnung ist die Gesamtlaufleistung der untersuchten Fahrzeugflotte von rund 33 Millionen Kilometern. In dem Szenario HBEFA verbleiben die CO_2-Emissionen in den kommenden 15 Jahren auf einem ähnlichen Niveau wie im Jahr 2015. Alle reglementierten Schadstoffemissionen (NO_X, CO, HC und PM) sinken im Vergleich zu 2015.

Jahr	Ausstoß CO_2 [t]	Ausstoß NO_x [t]	Ausstoß CO [t]	Ausstoß HC [t]	Ausstoß PM [t]
2015	39.873,04	185,11	30,60	3,56	1,54
2020	40.708,94	91,61	17,69	1,91	0,60
2025	40.931,73	41,21	10,64	1,41	0,30
2030	40.990,32	21,68	7,89	1,28	0,20

Tabelle 3: Entwicklung der lokalen Emissionen (Szenario HBEFA)

[12] http://www.hbefa.net/d/index.html

Im Falle eines theoretischen Markthochlaufs (Szenario E-Bus) von:

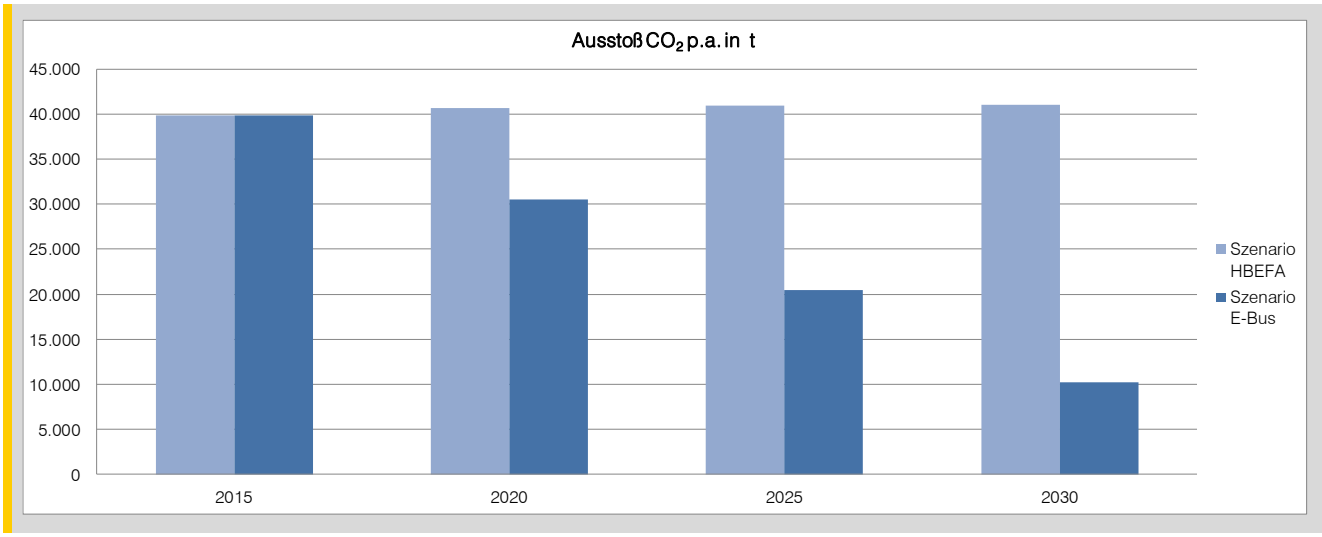
- 25 % lokal emissionsfreien Elektrobussen in 2020,
- 50 % lokal emissionsfreien Elektrobussen in 2025 und
- 75 % lokal emissionsfreien Elektrobussen in 2030

ergibt sich ein hohes Reduktionspotential aller lokal verkehrsbedingten Treibhausgas- und Schadstoffemissionen (vgl. Tabelle 4).

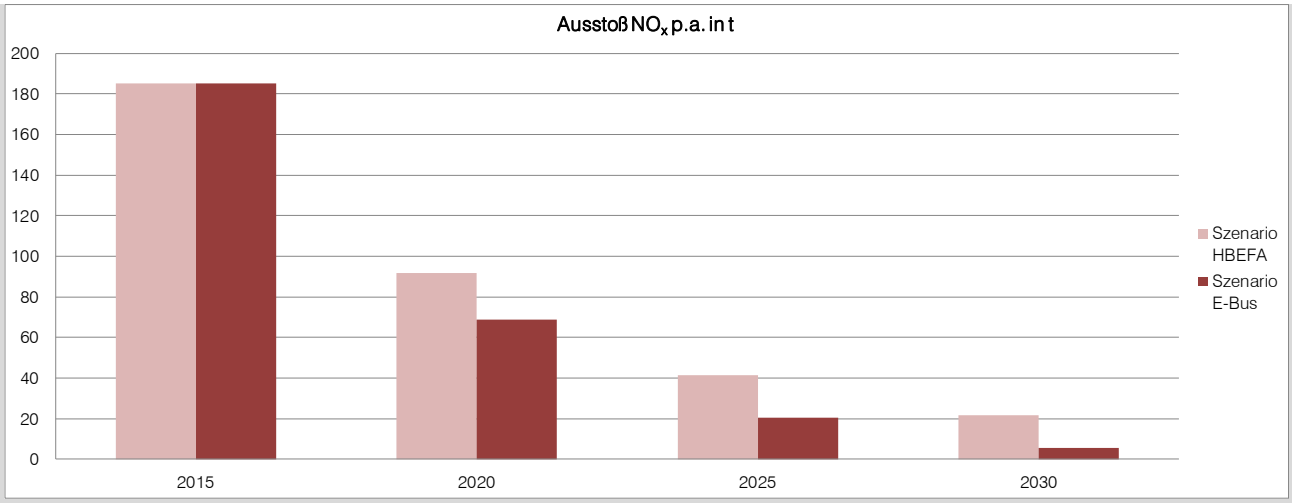
Jahr	Ausstoß CO_2 [t]	Ausstoß NO_x [t]	Ausstoß CO [t]	Ausstoß HC [t]	Ausstoß PM [t]
2015	39.873,04	185,11	30,60	3,56	1,54
2020	30.531,70	68,71	13,26	1,43	0,45
2025	20.465,86	20,60	5,32	0,70	0,15
2030	10.247,58	5,42	1,97	0,32	0,05

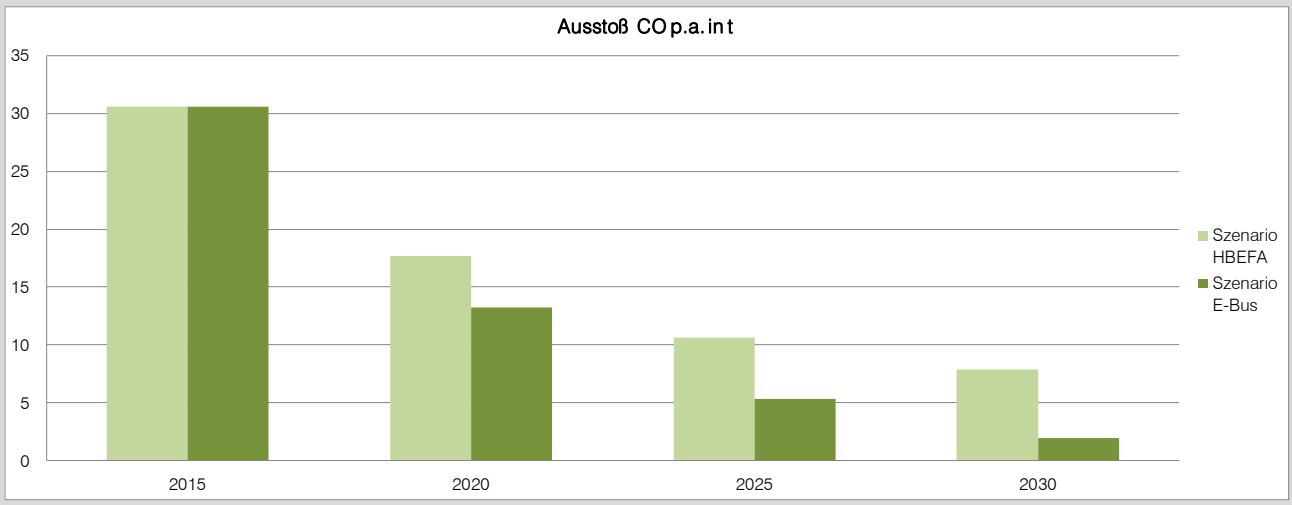
Tabelle 4: Entwicklung der lokalen Emissionen (Szenario E-Bus)

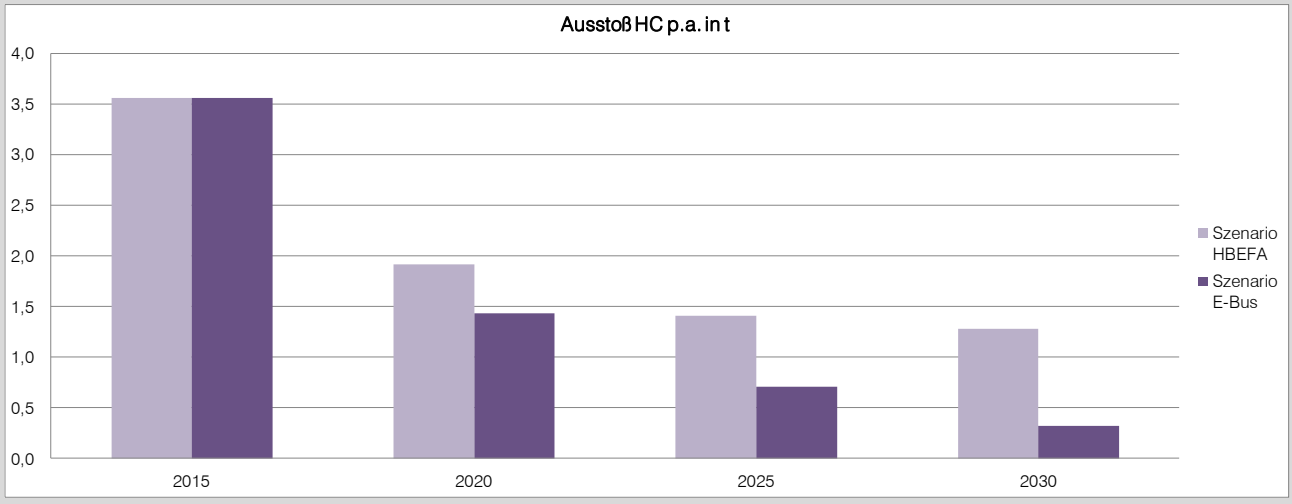
In den folgenden Abbildungen ist die Entwicklung der Treibhausgas- und Schadstoffemissionen beider Szenarien HBEFA und E-Bus abgebildet (vgl. Abbildung 19).



Bestandsaufnahme Infrastruktur und Fahrzeuge







Bestandsaufnahme Infrastruktur und Fahrzeuge

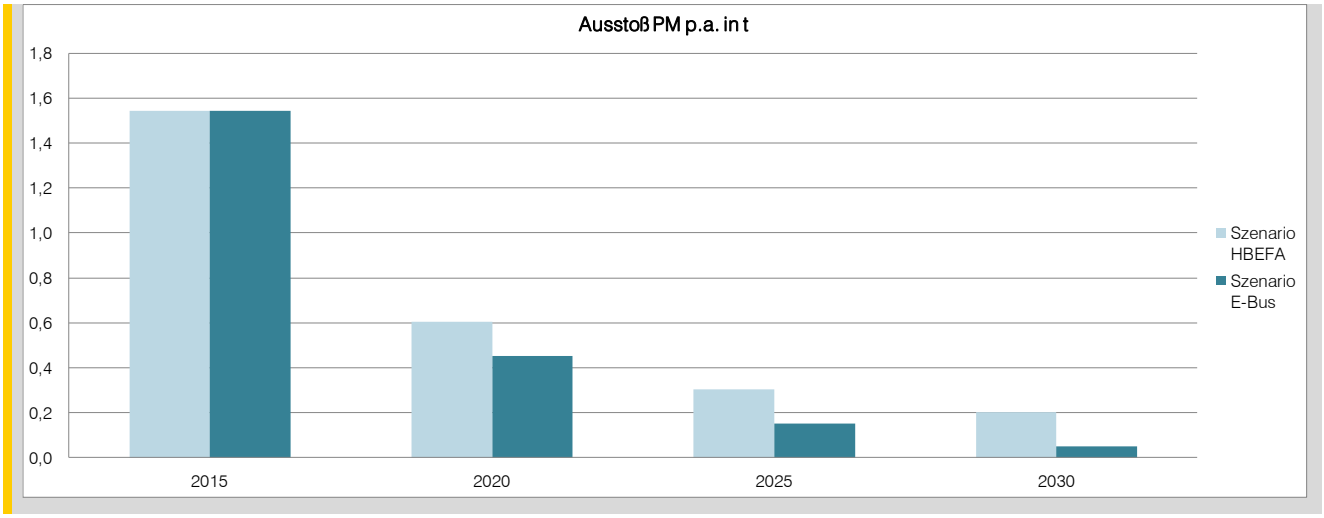


Abbildung 19: Entwicklung der lokalen Emissionen

5 Handlungsempfehlungen

5.1 Zusammenfassende Bewertung

Die Untersuchung der Anwendungsfälle erfolgte nach dem standardisierten Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV (BeSystO), auf Grundlage technischer, betrieblicher, betriebswirtschaftlicher und ökologischer Bewertungskriterien. Die aggregierten Ergebnisse aus der verkehrsunternehmensspezifischen Linienuntersuchung sind in der Anlage ersichtlich.

Betrieblich-technische Bewertung:

Landesweit konnte ein nahezu einheitlicher Einsatz von Fahrzeugen und Ladeinfrastrukturen und ein Minimum an anzuwendenden Ladestrategien und Ladesystemen identifiziert werden.

Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse bestätigen grundsätzlich die Umsetzbarkeit eines Elektrobussystems auf den betrachteten Linien der an der Studie beteiligten Verkehrsunternehmen. Die Umsetzung konnte zumeist ohne betriebliche Anpassungen nachgewiesen werden. Lediglich in wenigen Einsatzfällen sind geringfügige Änderungen im Betriebsablauf vorzunehmen, um einen sicheren Elektrobusbetrieb gewährleisten zu können.

Hinsichtlich der Ladestrategien können bei den untersuchten Verkehrsunternehmen in Sachsen-Anhalt sowohl Overnight-Charging-Batteriebusse (Volllader) als auch Opportunity-Charging-Batteriebusse (Gelegenheitslader) zum Einsatz kommen.

Für die Ladestrategie des Overnight-Charging-Batteriebusses (Volllader) wurde in allen Fällen ein Plug-In-System CCS (AC/DC-Übertragung) empfohlen. Die Ladestrategie des Opportunity-Charging-Batteriebusses (Gelegenheitslader) sieht eine Schnellladestation in der Ausprägung als Docking-Station mit Pantograph vor.

Die Linienuntersuchung erfolgte unter der Vorgabe möglichst geringe betriebliche und verkehrsplanerische Anpassungen vorzunehmen. Demzufolge sollten im Rahmen einer detaillierten Umsetzungsplanung betriebliche Optimierungen (Fahrplan, Wendezeiten) zu einer höheren Umsetzungsreife führen.

Wirtschaftliche Bewertung:

Die für die Wirtschaftlichkeitsermittlung angesetzten Kostenparameter wurden auf Basis von Marktpreisanalysen spezifisch für Fahrzeug, Energiespeicher, Ladeinfrastruktur, Werkstattausrüstung, Personalqualifizierung und Betriebskosten ermittelt. Auf Grundlage dieser Annahmen wurden verschiedene Szenarien gebildet, die eine zu erwartende Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems abbilden.

Grundsätzlich können die beim Elektrobussystem anfallenden hohen Investitionskosten nur durch hohe Laufleistungen während des Fahrzeugeinsatzes kompensiert werden. Demzufolge ergeben sich häufig erst im Falle einer Förderung wirtschaftliche Vorteile bei Anschaffung und Betrieb des Elektrobussystems.

Eine mögliche Förderung des Landes Sachsen-Anhalt von bis zu 80 % für Elektrobussysteme (Fahrzeuge und Infrastruktur) wurde bei der Untersuchung berücksichtigt. Der prognostizierte Fördermittelbedarf kann je nach Konfiguration des Elektrobussystems variieren.

Die aufgezeigten Betriebskosten beinhalten den Verlauf im Betrachtungsfall Middle Case–b, mittlere Kostenentwicklung beim E-Bus und Referenzbus. Dieser Betrachtungsfall ist aus Sicht der VCDB das präferierte Szenario für die zukünftige Entwicklung der Kosten, da es der realistischsten Kostenentwicklung beider Fahrzeugtypen entspricht.

Dabei ist zu beachten, dass es sich dabei um eine Mittelwertbestimmung über die Einsatzzeit von 16 Jahren handelt. Grundsätzlich wird unterstellt, dass bei positiver Betriebskostenentwicklung im Mittel ab dem 10. Einsatzjahr ein Break-Even-Point (Nutzenschwelle) erreicht wird.

Ökologische Bewertung:

Die ökologische Betrachtung erfolgte auf der Basis der DIN EN 16258-2013 mittels einer energie- und laufleistungsbezogenen CO_2-Äquivalent-Bilanzierung (CO_2-e) als Vergleichsdarstellung zwischen einem konventionell betriebenen Referenzbus auf der einen und dem Elektrobus mit dem aktuellen Strommix Deutschland auf der anderen Seite.

Ein Großteil der Emissionen lässt sich auf der für das städtische Mikroklima relevanten Tank-to-Wheel-Kette einsparen. Diese erfasst alle direkten Emissionen des Fahrzeugbetriebs. Elektrobusse, welche zusätzlich mit einer elektrischen Heizung ausgestattet werden, fahren lokal emissionsfrei und tragen zur Einhaltung der innerstädtischen Grenzwerte der Schadstoffbelastung und zur Verbesserung der Lebensqualität in Städten bei.

Neben der Möglichkeit des lokal emissionsfreien Öffentlichen Verkehrs durch die Installation eines Elektrobussystems, können in diesem Sys-

tem bei allen betrachteten Verkehrsunternehmen auf der Well-to-Wheel-Kette größere Einsparungen von Treibhausgasen und sonstigen Schadstoffen erzielt werden. Die Well-to-Wheel-Kette berücksichtigt alle Fahrzeug- und Energieprozesse und somit alle direkten und indirekten Emissionen. Im Endenergieverbrauch werden so alle Verluste der Vorkette berücksichtigt.

Aufgrund des lokal schadstofffreien Betriebs von Elektrobussystemen, den Einsparungen von Treibhausgasen und sonstigen Schadstoffen auf der Gesamtenergiekette (Well-to-Wheel-Kette) und einem hohen Lärmreduktionspotenzial, wird das Elektrobussystem der Rolle des Öffentlichen Verkehrs als umweltfreundliches und zukunftsorientiertes Verkehrsmittel gerecht. Auch aus ökologischer Sicht ist der Einsatz von Elektrobussen in Sachsen-Anhalt somit uneingeschränkt zu empfehlen.

5.2 Roadmap Elektromobilität im ÖPNV

Die Roadmap Elektromobilität für die Einführung elektrisch betriebener Linienbusse in Sachsen-Anhalt, sieht folgenden Realisierungsplan (vgl. Abbildung 20) vor, wobei Abweichungen und Änderungen möglich sind, sofern sich grundlegende Rahmenbedingungen ändern sollten und sich im Zeitverlauf andere Methoden als sinnvoll erweisen:

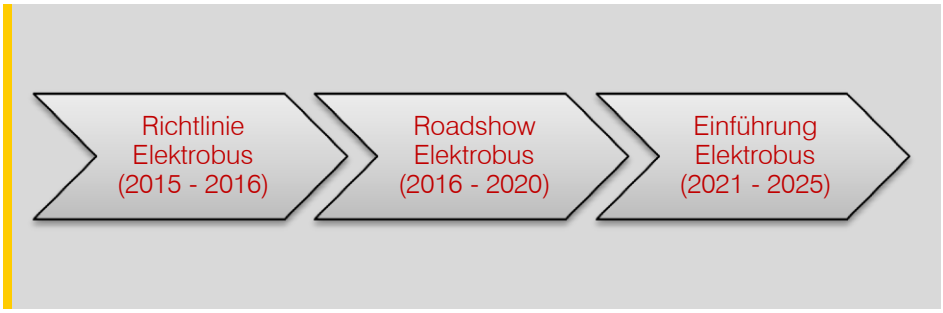


Abbildung 20: Roadmap Elektromobilität im ÖPNV

Richtlinie Elektrobus (2015-2016)

- Finalisierung der Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen zur Unterstützung umweltfreundlicher Verkehrsträger, Teilaktion "Förderung der Elektromobilität im ÖPNV"

Roadshow Elektrobus (2016-2020)

- Organisation von Testbussen als Akquiseleistung von Busherstellern, um erste Eindrücke und Erfahrungen mit dem System Elektrobus zu sammeln. Hierbei sollte mitbedacht werden, dass diese Elektrobussysteme im Rahmen einer „Roadshow“ für Demonstrationszwecke möglichst allen Verkehrsunternehmen Sachsen-Anhalts zur Verfügung gestellt werden, um die derzeit bestehenden Berührungsängste zu mildern und die Akzeptanz der neuen Technologie zu erhöhen.
- Detaillierte Umsetzungsplanung
  - Im Rahmen einer detaillierten Umsetzungsplanung in ausgesuchte Verkehrsunternehmen sollten geeignete Anwendungsfälle identifiziert werden, um das System Elektrobus erstmalig in Sachsen-Anhalt zu platzieren (Pilotprojekte).
  - Zielstellung bei der Umsetzung dieser Pilotprojekte sollte die Beschaffung von Elektrobussystemen (2x Mini-, 2x Standard-, 2x Gelenkbusse) sein, durch die die identifizierten Verkehrsunternehmen den Einsatz von Elektrobussen dauerhaft testen und Erfahrungen mit der neuen Technologie sammeln können (Multiplikatoren).

- Anwendung einer Matrix zur Eignungsbewertung von Vollladern bzw. Gelegenheitsladern (vgl. Abbildung 21) auf einer gegebenen Linie. Basierend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen der verkehrsunternehmensspezifischen Linienuntersuchungen wurde von der VCDB eine Matrix entwickelt, welche die Eignung einer konfigurierten Linie anhand bestimmter Eckdaten prüft und bewertet. Durch die Anwendung dieser Matrix wird eine grundlegende Ergebnisübertragbarkeit auf weitere Einsatzfälle gewährleistet. Die Anwendung dieser Matrix kann eine detaillierte Einzelfalluntersuchung nicht ersetzen, bietet aber eine erste Hilfestellung über die generelle Eignung eines Einsatzszenarios unter bestimmten vorgegebenen und zu definierenden Randbedingungen.

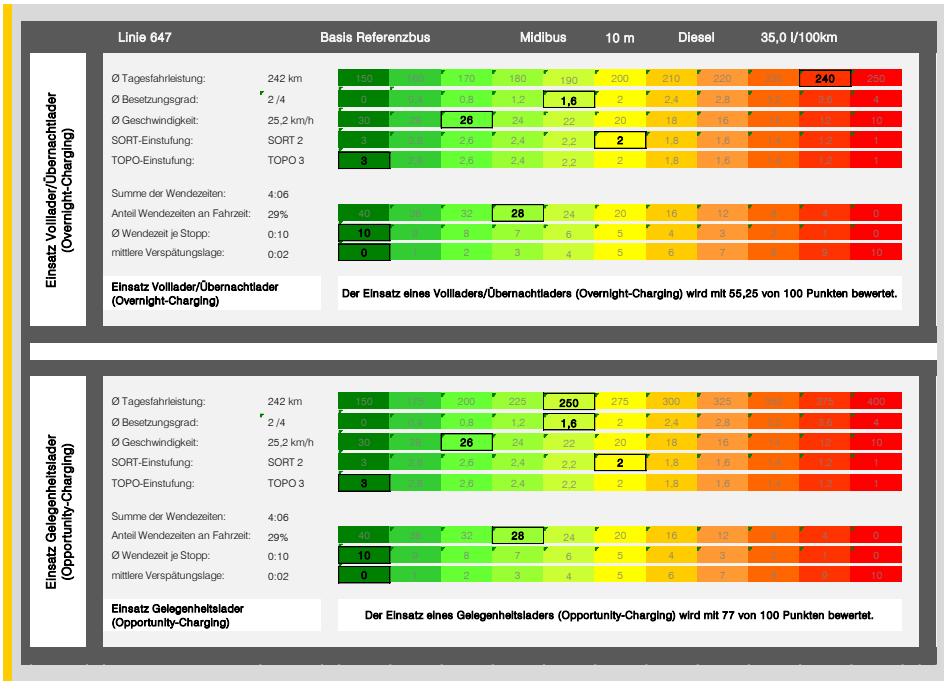


Abbildung 21: Matrix zur Eignungsbewertung

- Erstellung von Förderanträgen hinsichtlich der „Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen zur Unterstützung umweltfreundlicher Verkehrsträger Sachsen-Anhalts“ für die Pilotprojekte aus der detaillierten Umsetzungsplanung sowie die damit verbundene Sicherstellung der Finanzierung.
- Ausschreibung/Vergabe
  - Die Erstellung eines Rahmenlastenheftes für die Beschaffung von Elektrobussystemkomponenten (Elektrobusse, Ladeinfrastruktur, Werkstatteinrichtungen) ist empfehlenswert, um anhand der

Standardisierung Insellösungen zu vermeiden und letzendlich alle beteiligten Akteure (MLV, NASA GmbH, kommunale Aufgabenträger und Verkehrsunternehmen), bei der Umsetzung der zu erstellenden Förderrichtlinie zu unterstützen.

- Herstellung von Elektrobussen und Ladeinfrastruktur für die ausgesuchten Verkehrsunternehmen
- Konzeption detaillierter Einführungs- und Inbetriebnahmekonzepte zur Einführung der Elektrobussysteme aus den detaillierten Umsetzungsplanungen.
  - Einsatz von verkehrstelematischen Systemen zur Akzeptanzerhöhung der Elektrobussystemkomponenten, da bspw. Zusatzmodule, wie BeSystO online, über intelligente Algorithmen verfügen, die die Reichweite von Elektrobussen prognostiziert
- Öffentlichkeitsarbeit/Marketing
  - Durchführung landesweiter Workshops, um einen Erfahrungsaustausch zwischen den beteiligten Verkehrsunternehmen zu ermöglichen und somit den Systemgedanken des Elektrobusses in Sachsen-Anhalt weiter zu verankern.

Einführung Elektrobus (2021-2025)

- Aufbauend auf den Erfahrungen aus der „Roadshow Elektromobilität“ sollte in dieser „Einführungsphase“ der Weg von Einzelfahrzeugen hin zu einer ganzheitlichen Flottenlösung im gesamten Bundesland angestrebt werden.

Erste Elektrobusprojekte aus den detaillierten Umsetzungskonzepten werden in Betrieb genommen, um reale Betriebserfahrungen zu sammeln.

BeSystO®

Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV

© VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH

Untersuchung zur Einführung elektrisch betriebener Linienbusse in Sachsen-Anhalt

unter besonderer Berücksichtigung von Emissionen und Wirtschaftlichkeit

Anlage Verkehrsunternehmensspezifische Linienuntersuchungen

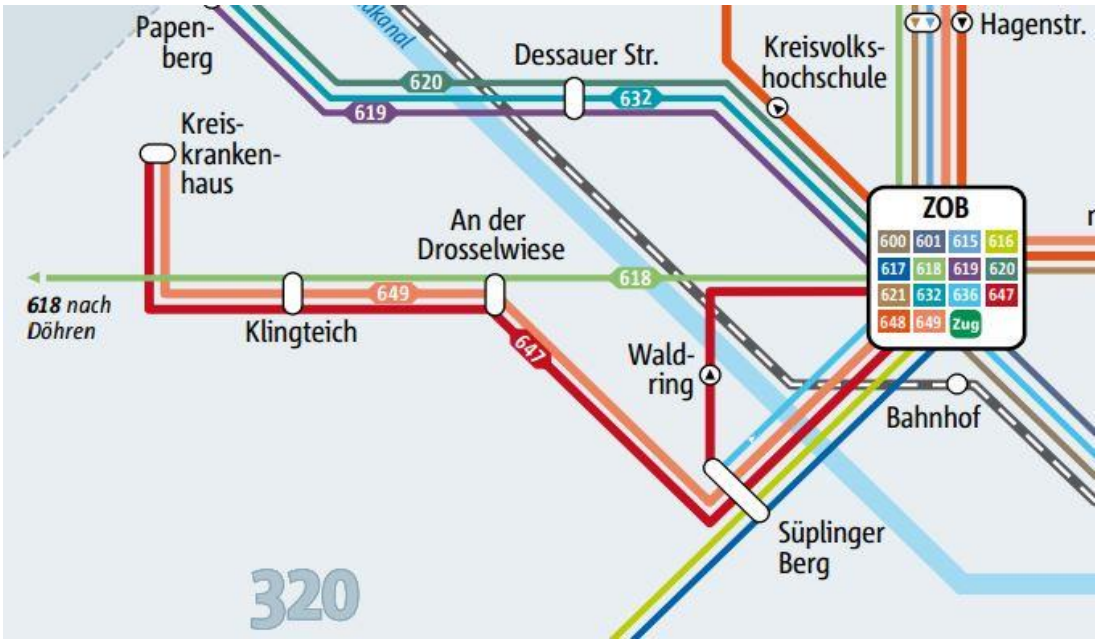
I. Börde Bus - BördeBus Verkehrsgesellschaft mbH 1
II. DVG - Dessauer Verkehrs GmbH 4
III. HAVAG - Hallesche Verkehrs-AG 7
IV. HVB - Harzer Verkehrsbetriebe GmbH 10
V. HVG - Halberstädter Verkehrs-GmbH 13
VI. KVG - Kreisverkehrsgesellschaft Salzland mbH 16
VII. MVB - Magdeburger Verkehrsbetriebe GmbH & Co. KG 19
VIII. PVG - Personenverkehrsgesellschaft Burgenlandkreis mbH 22
IX. PVGS - Personenverkehrsgesellschaft Altmarkkreis Salzwedel mbH 25
X. Stendalbus - Regionalverkehr Westsachsen GmbH (RVW) 28
XI. VGS - Verkehrsgesellschaft Südharz mbH 31

I. Börde Bus - BördeBus Verkehrsgesellschaft mbH

I.1. Liniendaten Linie 647

Liniendaten		
Linienverlauf:	Haldensleben - ZOB - Süplinger Berg - Kreiskrankenhaus	
Linienlänge:	7,5 km	
Fahrzeit:	00:23:00	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	20 km/h	
Fahrzeugeinsatz:	IST	PLAN
Fahrzeuganzahl:	2	2
Fahrzeugtyp:	Midibus	Midibus
Fahrzeugklasse:	10 m	10 m
Antriebsart:	Diesel	elektrisch

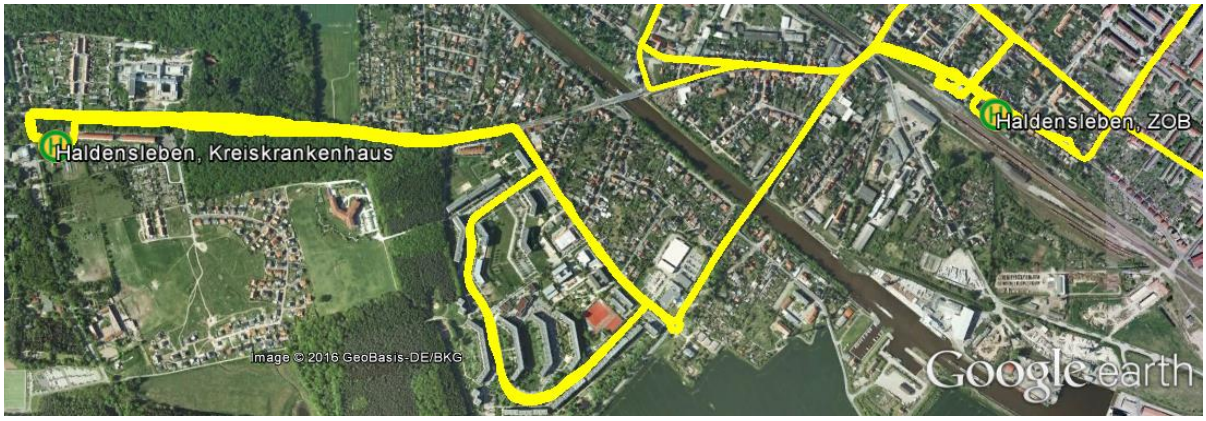
Liniennetzplan



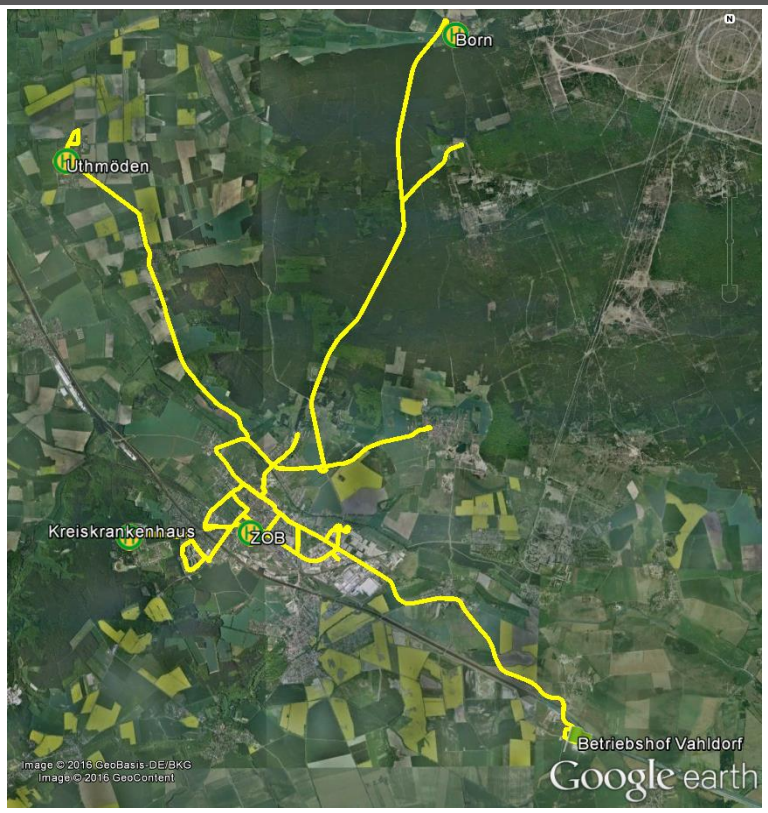
Bildquelle: https://www.boerde-bus.de/

I.2. Linienverlauf Linie 647

Linienverlauf Linie 647



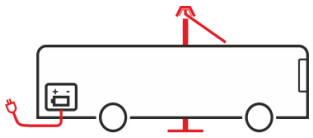
Kursverlauf Stadt- und Regionalverkehr Umlauf 97/121 (A24 / X24)



Höhenprofil Umlauf 97/121

I.3. Handlungsempfehlung Linie 647

Betrieblich-technische Bewertung



Midibus, Gelegenheitslader - Endpunkt
Nachladung am Endpunkt Haldensleben, ZOB und im Betriebshof
Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie, 120 kWh
Hybridheizung - Heizöl
E-Bus Klimaanlage

Die einzusetzenden Elektrobusse sind als Gelegenheitslader zu konfigurieren. Die Elektrobusse sind mit Hybridheizung sowie Klimaanlage für den Fahrgastraum auszustatten.

Die Auslegung der Ladepunkte erfolgte in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Ladezeit, der Batteriekapazität und der möglichen Nachladeleistung.

Die Ladestrategie sieht einen Ladepunkt am Endpunkt Haldensleben, ZOB vor. Die Stromübertragung erfolgt über eine Schnellladestation in der Ausprägung als Docking Station AC/DC-Übertragung (Pantograf als Docking-Station-System). Des Weiteren erfolgt eine Zwischenladung während der Pausenzeiten im Betriebshof über das Plug-In-System CCS (AC/DC-Übertragung).

Neben der Nachladung während des Betriebes ist eine Langsamladestation auf dem Betriebshof für das Laden über Nacht vorgesehen. Die Energiezuführung erfolgt über das Plug-In-System CCS (AC/DC-Übertragung).

Fazit

Die Untersuchung der Linie 647 des Börde Bus erfolgte nach dem standardisierten Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV (BeSystO), auf Grundlage technischer, betrieblicher, betriebswirtschaftlicher und ökologischer Bewertungskriterien.

Betrieblich-technische Bewertung:
Der Betrieb der Linie 647 ist als Gelegenheitslader mit Ladung am Endpunkt Haldensleben, ZOB und Übernachtladung im Betriebshof beim Einsatz eines Energiespeichers von 120 kWh ohne betriebliche Anpassungen möglich.

Wirtschaftliche Bewertung:
Im Middle-Case-Szenario ergeben sich ohne Förderung des Elektrobusses Kostenmehraufwände in Anschaffung und Betrieb gegenüber dem Referenzbus. Unter Berücksichtigung der Förderung und des betrachteten Einsatzzeitraums stellen die Anschaffung und der Betrieb des Elektrobussystems die wirtschaftlich günstigere Alternative dar.

Ökologische Bewertung:
Neben lokalen Einsparungen von Schadstoffemissionen (Tank-to-Wheel), können bei der Umsetzung des Elektrobussystems auf der für die ökologische Gesamtbilanzierung relevanten Well-to-Wheel-Kette hohe Einsparpotenziale hinsichtlich der Schadstoffemissionen erreicht werden.

Schlussfolgerung:
Die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf der Linie 647, inklusive aller Fahrten im Regionalverkehr, konnte betrieblich-technisch nachgewiesen werden. Basierend auf der Auswahl des kritischen Umlaufes ist der Einsatz von Elektrobussen von Montag bis Freitag ohne betriebliche Anpassungen möglich. Es ergeben sich unter Berücksichtigung der Förderung wirtschaftliche Vorteile bei Anschaffung und Betrieb des Elektrobussystems. Des Weiteren konnte ein hoher ökologischer Mehrwert nachgewiesen werden.

II. DVG - Dessauer Verkehrs GmbH

II.1. Liniendaten Linie 10/11/12

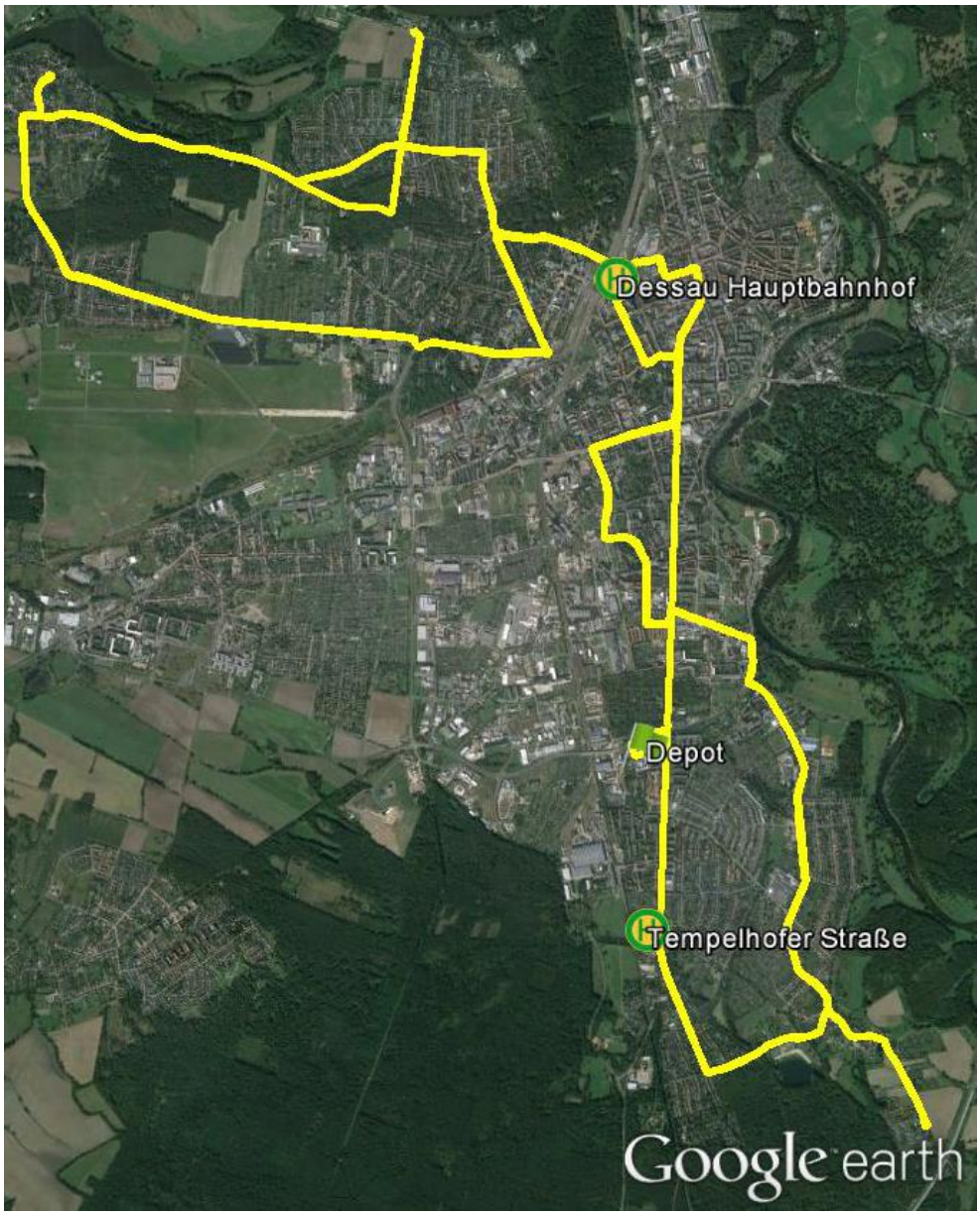
Liniendaten		
Linienverlauf:	Hauptbahnhof - Kühnau - Hauptbahnhof - Tempelhofer Str.	
Linienlänge:	ca. 36 km (variiert etwas je nach Kursweg)	
Fahrzeit:	ca. 01:36:00 (variiert etwas je nach Kursweg)	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	23 km/h	
Fahrzeugeinsatz:	IST	PLAN
Fahrzeuganzahl:	4	4
Fahrzeugtyp:	Standardbus	Standardbus
Fahrzeugklasse:	12 m	12 m
Antriebsart:	Erdgas	elektrisch

Liniennetzplan

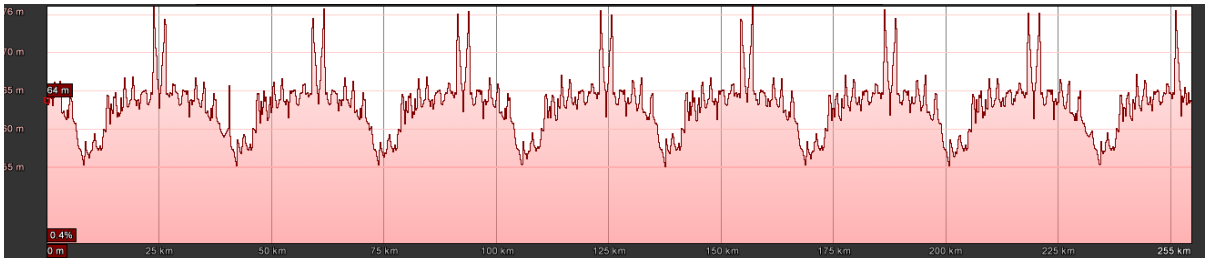
Bildquelle: DVG

II.2. Linienverlauf 10/11/12

Linienverlauf Linie 10 / 11 / 12

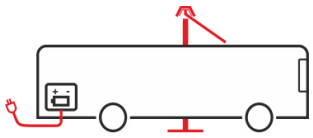


Höhenprofil Linie 10 / 11 / 12



II.3. Handlungsempfehlung 10/11/12

Betrieblich-technische Bewertung



Standardbus, Gelegenheitslader - Endpunkt
Nachladung am Endpunkt Dessau, Tempelhofer Straße und im Betriebshof
Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie, 120 kWh
Hybridheizung - Erdgas
Fahrerarbeitsplatz

Die einzusetzenden Elektrobusse sind als Gelegenheitslader zu konfigurieren. Die Elektrobusse sind mit Hybridheizung sowie Klimaanlage für den Fahrerarbeitsplatz auszustatten.

Die Auslegung der Ladepunkte erfolgte in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Ladezeit, der Batteriekapazität und der möglichen Nachladeleistung.

Die Ladestrategie sieht einen Ladepunkt am Endpunkt Dessau, Tempelhofer Straße vor. Die Stromübertragung erfolgt über eine Docking Station in der Ausprägung als DC/DC-Ladestation (Pantograf als Docking-Station-System). Der Anschluss der Ladestation erfolgt an die am Endpunkt vorhandene Straßenbahninfrastruktur (Oberleitung).

Neben der Nachladung während des Betriebes ist je Bus eine Langsamladestation auf dem Betriebshof für das Laden über Nacht vorgesehen. Die Energiezuführung erfolgt über das AC/DC-Ladesystem (Plug-In-System CCS).

Fazit

Die Untersuchung der Linien 10, 11 und 12 der Stadtwerke Dessau erfolgte nach dem standardisierten Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV (BeSystO), auf Grundlage technischer, betrieblicher, betriebswirtschaftlicher und ökologischer Bewertungskriterien.

Betrieblich-technische Bewertung:
Der Betrieb der Linie 10, 11 und 12 ist als Gelegenheitslader mit Ladung am Endpunkt Dessau, Tempelhofer Str. und Übernachtladung im Betriebshof beim Einsatz eines Energiespeichers von 120 kWh ohne betriebliche Anpassungen möglich.

Wirtschaftliche Bewertung:
Im Middle-Case-Szenario ergeben sich ohne Förderung des Elektrobusses Kostenmehraufwände in Anschaffung und Betrieb gegenüber dem Referenzbus. Unter Berücksichtigung der Förderung und des betrachteten Einsatzzeitraums stellen die Anschaffung und der Betrieb des Elektrobussystems die wirtschaftlich günstigere Alternative dar.

Ökologische Bewertung:
Neben lokalen Einsparungen von Schadstoffemissionen (Tank-to-Wheel), können bei der Umsetzung des Elektrobussystems auf der für die ökologische Gesamtbilanzierung relevanten Well-to-Wheel-Kette hohe Einsparpotenziale hinsichtlich der Schadstoffemissionen erreicht werden.

Schlussfolgerung:
Die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf den Linien 10, 11 und 12 konnte betrieblich-technisch nachgewiesen werden. Basierend auf der Auswahl des kritischen Umlaufes ist der Einsatz von Elektrobussen während der gesamten Woche ohne betriebliche Anpassungen möglich. Es ergeben sich unter Berücksichtigung der Förderung wirtschaftliche Vorteile bei Anschaffung und Betrieb des Elektrobussystems. Des Weiteren konnte ein hoher ökologischer Mehrwert nachgewiesen werden.

III. HAVAG - Hallesche Verkehrs-AG

III.1. Liniendaten Linie 21

Liniendaten		
Linienverlauf:	Kröllwitz - Krankenhaus Martha-Maria - Am Bruchsee	
Linienlänge:	ca. 27 km (variiert etwas je nach Kursweg)	
Fahrzeit:	ca. 01:00:00 (variiert etwas je nach Kursweg)	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	26 km/h	
Fahrzeugeinsatz:	IST	PLAN
Fahrzeuganzahl:	3	3
Fahrzeugtyp:	Standardbus	Standardbus
Fahrzeugklasse:	12 m	12 m
Antriebsart:	Diesel	elektrisch

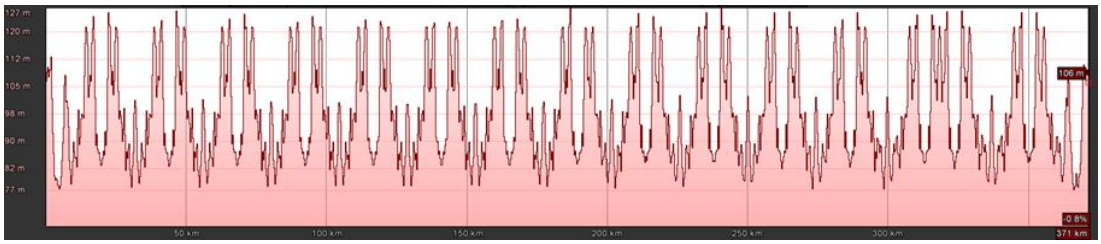
Liniennetzplan

Bildquelle: http://www.havag.com/

III.2. Linienverlauf Linie 21

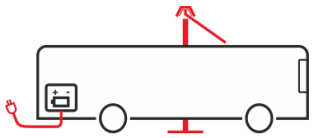
Linienverlauf Linie 21 (Umlauf 21-1)

Höhenprofil



III.3. Handlungsempfehlung Linie 21

Betrieblich-technische Bewertung



Standardbus, Gelegenheitslader - Endpunkt
Nachladung am Endpunkt Halle, Kröllwitz und im Betriebshof
Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie, 120 kWh
Hybridheizung - Diesel
Fahrerarbeitsplatz

Die einzusetzenden Elektrobusse sind als Gelegenheitslader zu konfigurieren. Die Elektrobusse sind mit Hybridheizung sowie Klimaanlage für den Fahrerarbeitsplatz auszustatten.

Die Auslegung der Ladepunkte erfolgte in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Ladezeit, der Batteriekapazität und der möglichen Nachladeleistung.

Die Ladestrategie sieht einen Ladepunkt am Endpunkt Halle, Kröllwitz vor. Die Stromübertragung erfolgt über eine Schnellladestation in der Ausprägung als Docking Station DC/DC-Übertragung (Pantograf als Docking-Station-System). Der Anschluss erfolgt an die am Endpunkt vorhandene Straßenbahninfrastruktur (Unterwerk).

Neben der Nachladung während des Betriebes ist eine Langsamladestation auf dem Betriebshof für das Laden über Nacht vorgesehen. Die Energiezuführung erfolgt über das Plug-In-System CCS (AC/DC-Übertragung).

Fazit

Die Untersuchung der Linie 21 der HVAG erfolgte nach dem standardisierten Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV (BeSystO), auf Grundlage technischer, betrieblicher, betriebswirtschaftlicher und ökologischer Bewertungskriterien.

Betrieblich-technische Bewertung:
Der Betrieb der Linie 21 ist als Gelegenheitslader mit Ladung am Endpunkt Halle, Kröllwitz und Übernachtladung im Betriebshof beim Einsatz eines Energiespeichers von 120 kWh ohne betriebliche Anpassungen möglich. Die hohen Fahrleistung der Busse gepaart mit optimalen Ladezeiten an den Endpunkten stellen optimale Betriebsbedingungen für ein Elektrobussystem dar. Die derzeit sehr hohe Platzkapazität des Referenzfahrzeuges wird bei dieser Elektrobuskonfiguration nicht vollständig erreicht.

Wirtschaftliche Bewertung:
Im Middle-Case-Szenario ergeben sich ohne Förderung des Elektrobusses Kostenmehraufwände in Anschaffung und Betrieb gegenüber dem Referenzbus. Unter Berücksichtigung der Förderung und des betrachteten Einsatzzeitraums stellen die Anschaffung und der Betrieb des Elektrobussystems die wirtschaftlich günstigere Alternative dar.

Ökologische Bewertung:
Neben lokalen Einsparungen von Schadstoffemissionen (Tank-to-Wheel), können bei der Umsetzung des Elektrobussystems auf der für die ökologische Gesamtbilanzierung relevanten Well-to-Wheel-Kette sehr hohe Einsparpotenziale hinsichtlich der Schadstoffemissionen erreicht werden.

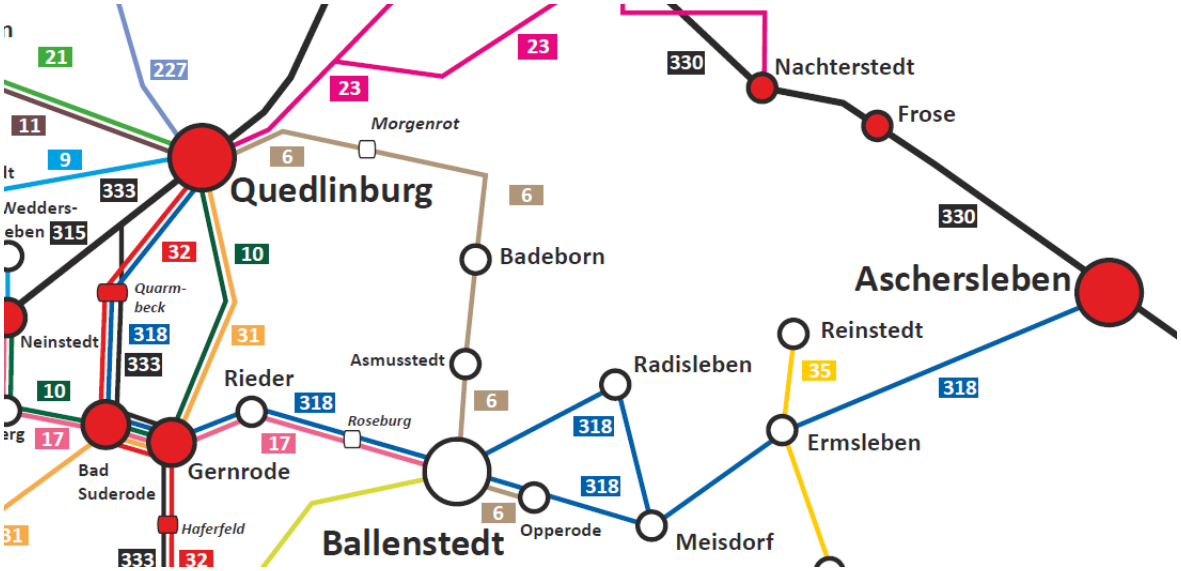
Schlussfolgerung:
Die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf der Linie 21 konnte betrieblich-technisch nachgewiesen werden. Basierend auf der Auswahl des kritischen Umlaufes ist der Einsatz von Elektrobussen während der gesamten Woche ohne betriebliche Anpassungen möglich. Es ergeben sich unter Berücksichtigung der Förderung wirtschaftliche Vorteile bei Anschaffung und Betrieb des Elektrobussystems. Des Weiteren konnte ein hoher ökologischer Mehrwert nachgewiesen werden.

IV. HVB - Harzer Verkehrsbetriebe GmbH

IV.1. Liniendaten Linie 318

Liniendaten		
Linienverlauf:	Quedlinburg - Bad Suderode - Ballenstedt - Aschersleben	
Linienlänge:	ca. 40 km (variiert etwas je nach Kursweg)	
Fahrzeit:	ca. 01:09:00 (variiert etwas je nach Kursweg)	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	34 km/h	
Fahrzeugeinsatz:	IST	PLAN
Fahrzeuganzahl:	1	1
Fahrzeugtyp:	Standardbus	Standardbus
Fahrzeugklasse:	12 m	12 m
Antriebsart:	Erdgas	elektrisch

Liniennetzplan

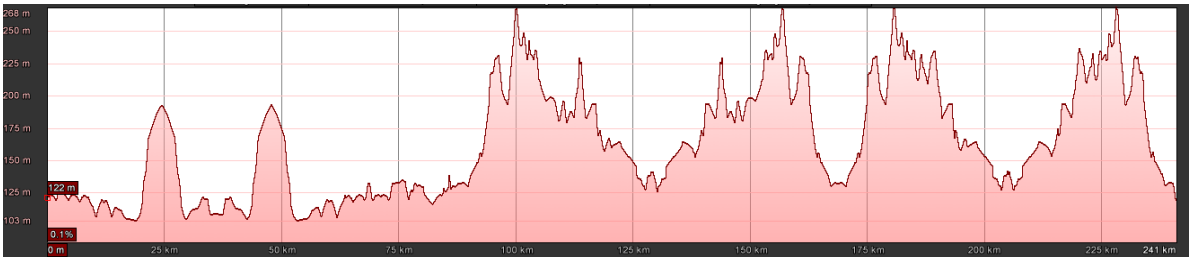


Bildquelle: http://hvb-harz.de/

IV.2. Linienverlauf Linie 318

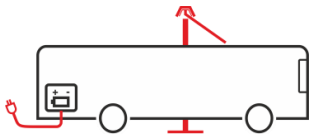
Linienverlauf Linie 318 (Umlauf 2122)

Höhenprofil Linie 318 (Umlauf 2122)



IV.3. Handlungsempfehlung Linie 318

Betrieblich-technische Bewertung



Standardbus, Gelegenheitslader - Endpunkt
Nachladung am Endpunkt Aschersleben, Busbahnhof und im Betriebshof
Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator (LiFePO4), Hochleistungsbatterie, 150 kWh
Hybridheizung - Diesel
Fahrerarbeitsplatz

Die einzusetzenden Elektrobusse sind als Gelegenheitslader zu konfigurieren. Die Elektrobusse sind mit Hybridheizung sowie Klimaanlage für den Fahrerarbeitsplatz auszustatten.

Die Auslegung der Ladepunkte erfolgt in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Ladezeit, der Batteriekapazität und der möglichen Nachladeleistung.

Die Ladestrategie sieht einen Ladepunkt am Endpunkt Aschersleben, Busbahnhof vor. Die Stromübertragung erfolgt über eine Schnellladestation in der Ausprägung als Docking Station AC/DC-Übertragung (Pantograf als Docking-Station-System). Des Weiteren erfolgt eine Ladung während der Pausenzeiten im Betriebshof Quedlinburg, Verkehrshof in der Ausprägung als Plug-In-System CCS (AC/DC-Übertragung).

Neben der Nachladung während des Betriebes ist eine Ladestation auf dem Betriebshof für das Laden über Nacht vorgesehen. Die Energiezuführung erfolgt über das Plug-In-System CCS (AC/DC-Übertragung).

Fazit

Die Untersuchung der Linie 318 der HVB erfolgte nach dem standardisierten Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV (BeSystO), auf Grundlage technischer, betrieblicher, betriebswirtschaftlicher und ökologischer Bewertungskriterien.

Betrieblich-technische Bewertung:
Der Betrieb der Linie 318 ist als Gelegenheitslader mit Ladung am Endpunkt Aschersleben, Busbahnhof, während der Pausenzeiten im Betriebshof sowie mit Übernachtladung im Betriebshof beim Einsatz eines Energiespeichers von 150 kWh ohne betriebliche Anpassungen möglich.

Wirtschaftliche Bewertung:
Im Middle-Case-Szenario ergeben sich ohne Förderung des Elektrobusses Kostenmehraufwände in Anschaffung und Betrieb gegenüber dem Referenzbus. Unter Berücksichtigung der Förderung und des betrachteten Einsatzzeitraums stellen die Anschaffung und der Betrieb des Elektrobussystems die wirtschaftlich günstigere Alternative dar. Da die HVB beabsichtig, die Ladeinfrastruktur nicht eigenständig zu erwerben und zu betreiben, sind die entstehenden Kosten anteilig auf die Stromvergütung umgelegt.

Ökologische Bewertung:
Neben lokalen Einsparungen von Schadstoffemissionen (Tank-to-Wheel), können bei der Umsetzung des Elektrobussystems auf der für die ökologische Gesamtbilanzierung relevanten Well-to-Wheel-Kette hohe Einsparpotenziale hinsichtlich der Schadstoffemissionen erreicht werden.

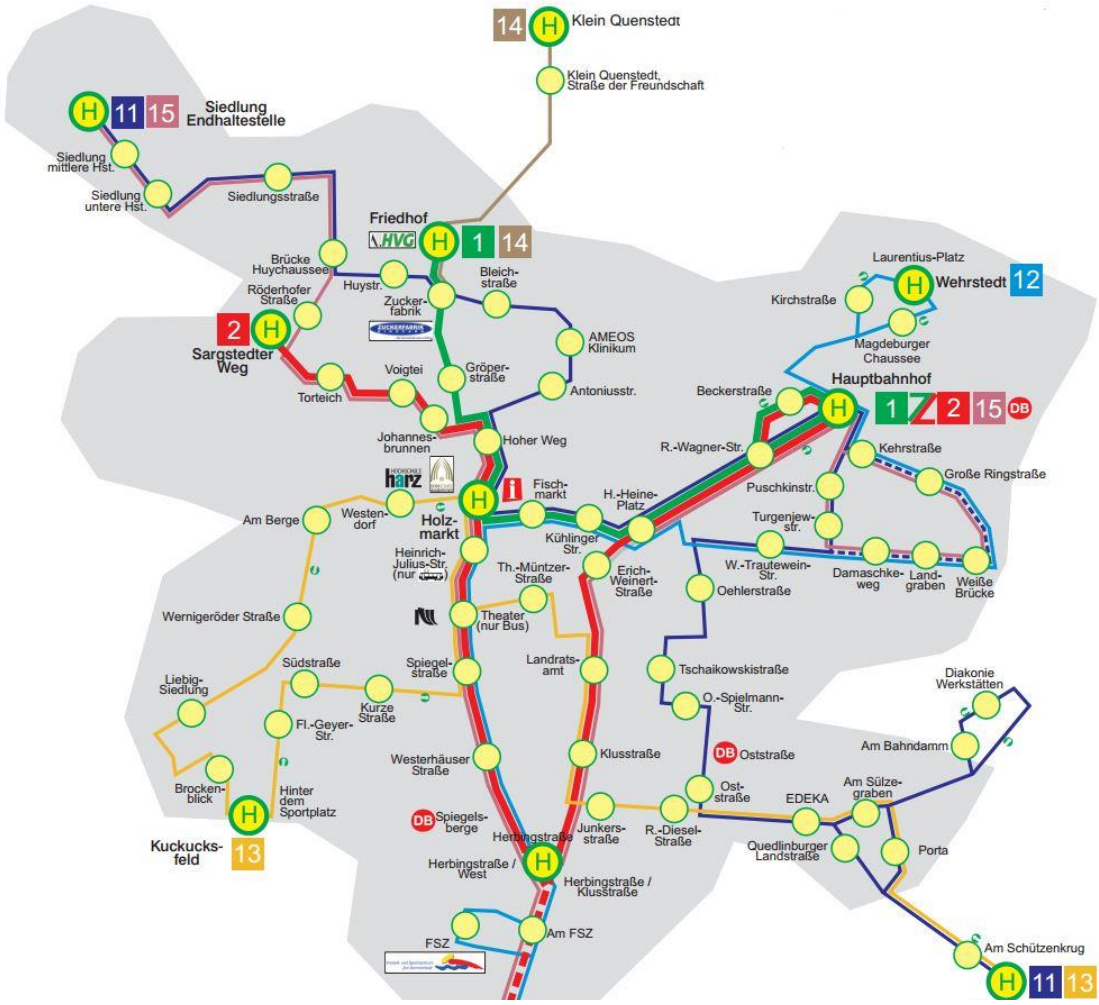
Schlussfolgerung:
Die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf der Linie 318 konnte betrieblich-technisch nachgewiesen werden. Basierend auf der Auswahl des kritischen Umlaufes ist der Einsatz von Elektrobussen während dem gesamten Wochenbetrieb ohne betriebliche Anpassungen möglich. Es ergeben sich unter Berücksichtigung der Förderung wirtschaftliche Vorteile bei Anschaffung und Betrieb des Elektrobussystems. Des Weiteren konnte ein hoher ökologischer Mehrwert nachgewiesen werden.

V. HVG - Halberstädter Verkehrs-GmbH

V.1. Liniendaten Linie 11/14

Liniendaten		
Linienverlauf:	Sargstedter Siedl. - Hbf-Harslbn./14:Zuckerfabr. - Kl. Quenstedt	
Linienlänge:	ca. 35 km (variiert etwas je nach Kursweg)	
Fahrzeit:	ca. 01:30:00 (variiert etwas je nach Kursweg)	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	21 km/h	
Fahrzeugeinsatz:	IST	PLAN
Fahrzeuganzahl:	2	2
Fahrzeugtyp:	Standardbus	Standardbus
Fahrzeugklasse:	12 m	12 m
Antriebsart:	Erdgas	elektrisch

Liniennetzplan

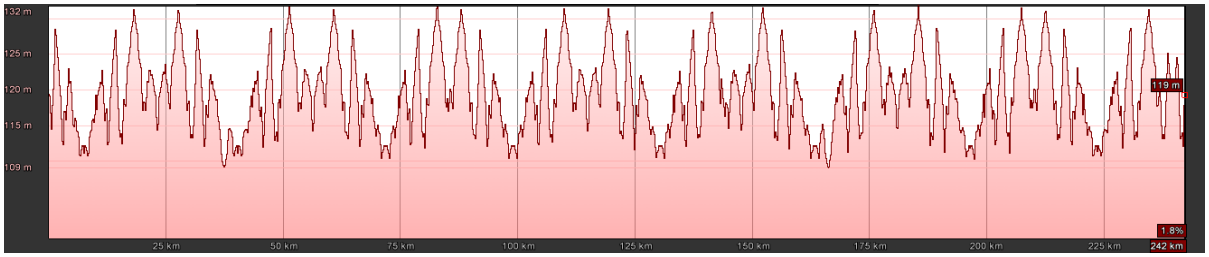


Bildquelle: http://www.stadtverkehr-halberstadt.de/

V.2. Linienverlauf Linie 11/14

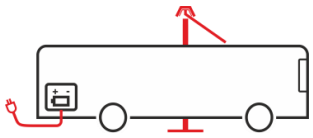
Linienverlauf Linien 11/14 (Umlauf 11181)

Höhenprofil



V.3. Handlungsempfehlung Linie 11/14

Betrieblich-technische Bewertung



Standardbus, Gelegenheitslader - Endpunkt
Nachladung am Endpunkt Halberstadt, Siedlung Endhaltestelle und im Betriebshof
Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie, 120 kWh
voll elektrisch
E-Bus Klimaanlage

Die einzusetzenden Elektrobusse sind als Gelegenheitslader zu konfigurieren. Die Elektrobusse sind mit voll elektrischer Heizung sowie einer E-Bus Klimaanlage auszustatten.

Die Auslegung der Ladepunkte erfolgt in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Ladezeit, der Batteriekapazität und der möglichen Nachladeleistung.

Die Ladestrategie sieht einen Ladepunkt am Endpunkt Halberstadt, Siedlung Endhaltestelle vor. Die Stromübertragung erfolgt über eine Schnellladestation in der Ausprägung als AC/DC-Ladestation (Pantograf als Docking-Station-System).

Neben der Nachladung während des Betriebes ist eine Langsamladestation auf dem Betriebshof für das Laden über Nacht vorgesehen. Die Energiezuführung erfolgt über das AC/DC-Ladesystem (Plug-In-System CCS).

Fazit

Die Untersuchung der Linien 11 und 14 der HVB erfolgte nach dem standardisierten Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV (BeSystO), auf Grundlage technischer, betrieblicher, betriebswirtschaftlicher und ökologischer Bewertungskriterien.

Betrieblich-technische Bewertung:
Der Betrieb der Linie 647 ist als Gelegenheitslader mit Ladung am Endpunkt Halberstadt, Siedlung und Übernachtladung im Betriebshof beim Einsatz eines Energiespeichers von 120 kWh ohne betriebliche Anpassungen möglich.

Wirtschaftliche Bewertung:
Im Middle-Case-Szenario ergeben sich ohne Förderung des Elektrobusses Kostenmehraufwände in Anschaffung und Betrieb gegenüber dem Referenzbus. Unter Berücksichtigung der Förderung und des betrachteten Einsatzzeitraums stellen die Anschaffung und der Betrieb des Elektrobussystems die wirtschaftlich günstigere Alternative dar.

Ökologische Bewertung:
Neben der vollständigen Einsparung von lokalen Schadstoffemissionen (Tank-to-Wheel) infolge der Nutzung einer elektrischen Heizung, können bei der Umsetzung des Elektrobussystems auf der für die ökologische Gesamtbilanzierung relevanten Well-to-Wheel-Kette hohe Einsparpotenziale hinsichtlich der Schadstoffemissionen erreicht werden.

Schlussfolgerung:
Die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf den Linien 11 und 14 konnte betrieblich-technisch nachgewiesen werden. Basierend auf der Auswahl des kritischen Umlaufes ist der Einsatz von Elektrobussen von Montag bis Freitag ohne betriebliche Anpassungen möglich. Es ergeben sich unter Berücksichtigung der Förderung wirtschaftliche Vorteile bei Anschaffung und Betrieb des Elektrobussystems. Des Weiteren konnte ein hoher ökologischer Mehrwert nachgewiesen werden.

VI. KVG - Kreisverkehrsgesellschaft Salzland mbH

VI.1. Liniendaten Linie 115

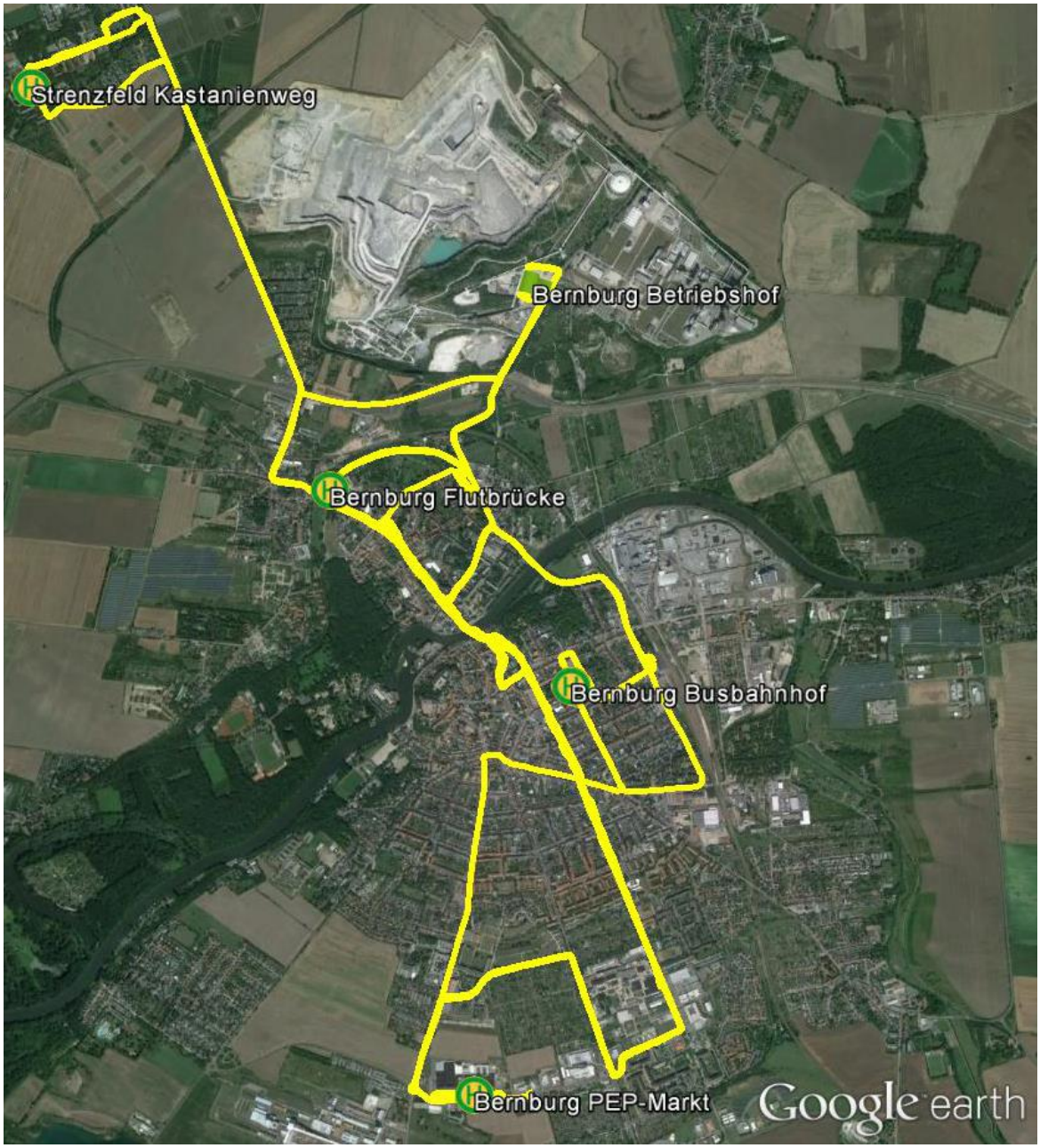
Liniendaten		
Linienverlauf:	Flutbrücke - PEP-Markt	
Linienlänge:	14,8 km	
Fahrzeit:	00:45:00	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	21 km/h	
Fahrzeugeinsatz:	IST	PLAN
Fahrzeuganzahl:	1	1
Fahrzeugtyp:	Midibus	Midibus
Fahrzeugklasse:	10 m	10 m
Antriebsart:	Diesel	elektrisch

Liniennetzplan

Bildquelle: http://www.kvg-salzland.de/

VI.2. Linienverlauf Linie 115

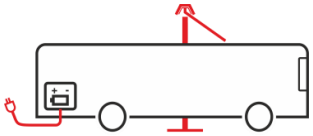
Linienverlauf Linie 112 (Umlauf 3 / 4)



Höhenprofil Umlauf 3 / 4

VI.3. Handlungsempfehlung Linie 115

Betrieblich-technische Bewertung



Midibus, Gelegenheitslader - Endpunkt
Nachladung im Betriebshof
Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie, 120 kWh
Hybridheizung - Heizöl
Fahrerarbeitsplatz

Die einzusetzenden Elektrobusse sind als Gelegenheitslader mit Ladung im Betriebshof zu konfigurieren. Die Elektrobusse sind mit Hybridheizung sowie Klimaanlage für den Fahrerarbeitsplatz auszustatten.

Die Auslegung der Ladepunkte erfolgt in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Ladezeit, der Batteriekapazität und der möglichen Nachladeleistung.

Die Ladestrategie sieht eine Ladung während der Pausenzeiten im Betriebshof vor. Die Stromübertragung erfolgt über eine Schnellladestation in der Ausprägung als Docking Station AC/DC-Übertragung (Pantograf als Docking-Station-System).

Neben der Nachladung während des Betriebes ist eine Langsamladestation auf dem Betriebshof für das Laden über Nacht vorgesehen. Die Energiezuführung erfolgt über das Plug-In-System CCS (AC/DC-Übertragung).

Fazit

Die Untersuchung der Linie 115 der KVG erfolgte nach dem standardisierten Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV (BeSystO), auf Grundlage technischer, betrieblicher, betriebswirtschaftlicher und ökologischer Bewertungskriterien.

Betrieblich-technische Bewertung:
Der Betrieb der Linie 115 ist als Gelegenheitslader mit Nachladung im Betriebshof Bernburg beim Einsatz eines Energiespeichers von 120 kWh ohne betriebliche Anpassungen möglich.

Wirtschaftliche Bewertung:
Im Middle-Case-Szenario ergeben sich ohne Förderung des Elektrobusses Kostenmehraufwände in Anschaffung und Betrieb gegenüber dem Referenzbus. Unter Berücksichtigung der Förderung und des betrachteten Einsatzzeitraums stellen die Anschaffung und der Betrieb des Elektrobussystems die wirtschaftlich günstigere Alternative dar.

Ökologische Bewertung:
Neben lokalen Einsparungen von Schadstoffemissionen (Tank-to-Wheel), können bei der Umsetzung des Elektrobussystems auf der für die ökologische Gesamtbilanzierung relevanten Well-to-Wheel-Kette hohe Einsparpotenziale hinsichtlich der Schadstoffemissionen erreicht werden.

Schlussfolgerung:
Die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf der Linie 115, inkl. aller Fahrten im Stadt- und Regionalverkehr, konnte betrieblich-technisch nachgewiesen werden. Basierend auf der Auswahl des kritischen Umlaufes ist der Einsatz von Elektrobussen im gesamten Wochenbetrieb ohne betriebliche Anpassungen möglich. Es ergeben sich unter Berücksichtigung der Förderung wirtschaftliche Vorteile bei Anschaffung und Betrieb des Elektrobussystems. Des Weiteren konnte ein hoher ökologischer Mehrwert nachgewiesen werden.

VII. MVB - Magdeburger Verkehrsbetriebe GmbH & Co. KG

VII.1. Liniendaten Linie 73

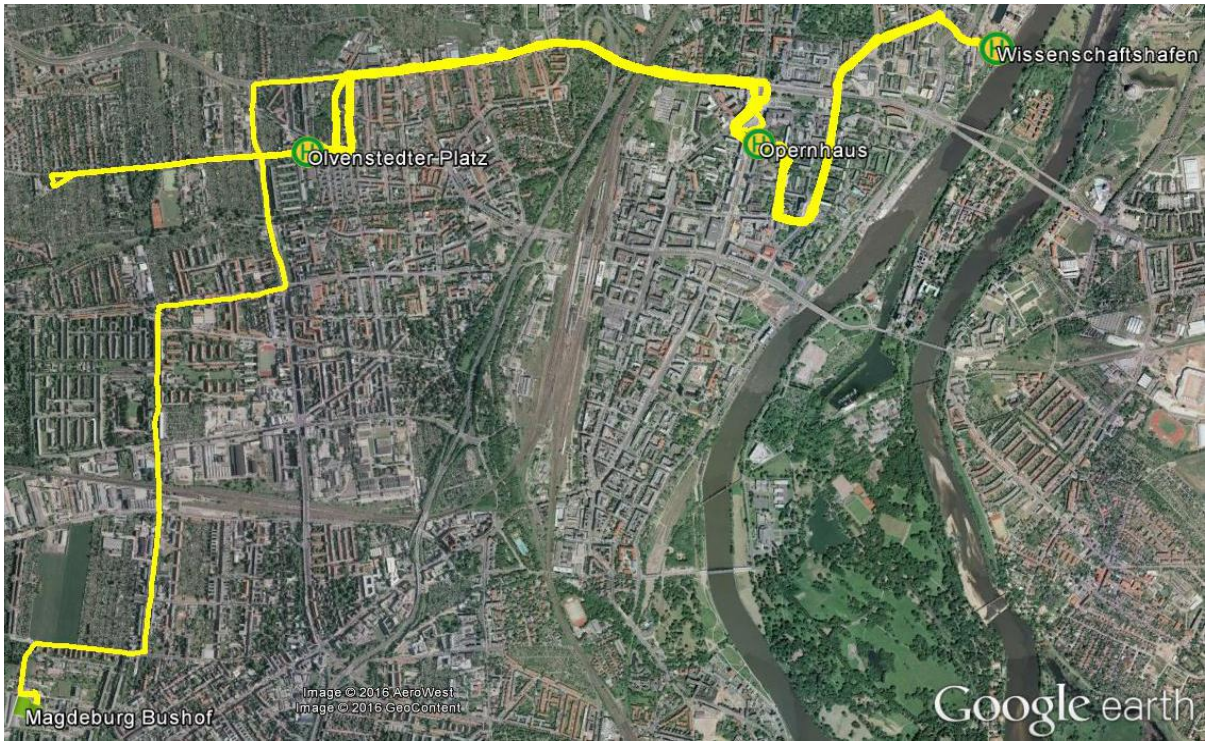
Liniendaten		
Linienverlauf:	Olvenstedter Platz - Opernhaus - Wissenschaftshafen	
Linienlänge:	10,9 km	
Fahrzeit:	00:35:00	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	20 km/h	
Fahrzeugeinsatz-IST:	IST	PLAN
Fahrzeuganzahl:	3	3
Fahrzeugtyp:	Gelenkbus	Gelenkbus
Fahrzeugklasse:	18 m	18 m
Antriebsart:	Diesel	elektrisch

Liniennetzplan

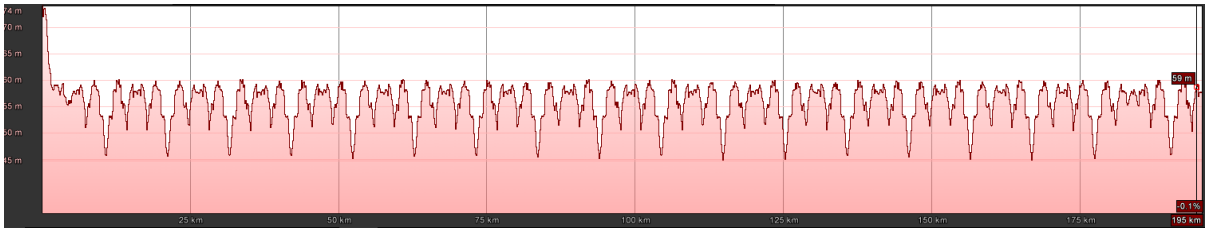
Bildquelle: http://www.mvbnet.de/

VII.2. Linienverlauf Linie 73

Linienverlauf Linie 73

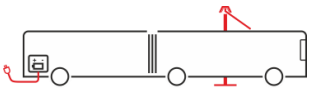


Höhenprofil



VII.3. Handlungsempfehlung Linie 73

Betrieblich-technische Bewertung



Gelenkbus, Gelegenheitslader - Endpunkt
Nachladung am Endpunkt Magdeburg, Olvenstedter Platz und im Betriebshof
Lithium-Titanat-Akkumulator (LTO), Hochleistungsbatterie, 150 kWh
voll elektrisch
Fahrerarbeitsplatz

Die einzusetzenden Elektrobusse sind als Gelegenheitslader zu konfigurieren. Die Elektrobusse sind mit vollelektrischer Heizung sowie Klimaanlage für den Fahrerarbeitsplatz auszustatten.

Die Auslegung der Ladepunkte erfolgt in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Ladezeit, der Batteriekapazität und der möglichen Nachladeleistung.

Die Ladestrategie sieht einen Ladepunkt am Endpunkt Magdeburg, Olvenstedter Platz vor. Die Stromübertragung erfolgt über eine Schnellladestation in der Ausprägung als Docking Station DC/DC-Übertragung (Pantograf als Docking-Station-System). Der Anschluss der Ladestation erfolgt an die am Endpunkt vorhandene Straßenbahninfrastruktur (Unterwerk).

Neben der Nachladung während des Betriebes ist eine Langsamladestation auf dem Betriebshof für das Laden über Nacht vorgesehen. Die Energiezuführung erfolgt über das Plug-In-System CCS (AC/DC-Übertragung).

Fazit

Die Untersuchung der Linie 73 der MVB erfolgte nach dem standardisierten Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV (BeSystO), auf Grundlage technischer, betrieblicher, betriebswirtschaftlicher und ökologischer Bewertungskriterien.

Die MVB repräsentiert den einzigen Einsatzfall eines Elektrobussytems mit Gelenkbussesn innerhalb der Gesamtuntersuchung der NASA.

Betrieblich-technische Bewertung:
Der Betrieb der Linie 73 ist als Gelegenheitslader mit Ladung am Endpunkt Magdeburg, Olvenstedter Platz und Übernachtladung im Betriebshof beim Einsatz eines Energiespeichers von 150 kWh ohne betriebliche Anpassungen möglich. Der Nachtbusverkehr wurde in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

Wirtschaftliche Bewertung:
Im Middle-Case-Szenario ergeben sich ohne Förderung des Elektrobusses Kostenmehraufwände in Anschaffung und Betrieb gegenüber dem Referenzbus. Unter Berücksichtigung der Förderung und des betrachteten Einsatzzeitraums stellen die Anschaffung und der Betrieb des Elektrobussystems die wirtschaftlich günstigere Alternative dar.

Ökologische Bewertung:
Neben der vollständigen Einsparung von lokalen Schadstoffemissionen (Tank-to-Wheel) infolge der Nutzung einer elektrischen Heizung, können bei der Umsetzung des Elektrobussystems auf der für die ökologische Gesamtbilanzierung relevanten Well-to-Wheel-Kette hohe Einsparpotenziale hinsichtlich der Schadstoffemissionen erreicht werden.

Schlussfolgerung:
Die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf der Linie 73 konnte betrieblich-technisch nachgewiesen werden. Basierend auf der Auswahl des kritischen Umlaufes ist der Einsatz von Elektrobussen im gesamten Wochenbetrieb ohne betriebliche Anpassungen möglich. Es ergeben sich unter Berücksichtigung der Förderung wirtschaftliche Vorteile bei Anschaffung und Betrieb des Elektrobussystems. Des Weiteren konnte ein hoher ökologischer Mehrwert nachgewiesen werden.

VIII. PVG - Personenverkehrsgesellschaft Burgenlandkreis mbH

VIII.1. Liniendaten Linie 102

Liniendaten		
Linienverlauf:	City-Busst. - Markt - Schreberstr.- Ostbhf. - City-Busst.	
Linienlänge:	7,2 km	
Fahrzeit:	00:30:00	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	15 km/h	
Fahrzeugeinsatz:	IST	PLAN
Fahrzeuganzahl:	1	1
Fahrzeugtyp:	Standardbus	Standardbus
Fahrzeugklasse:	12 m	12 m
Antriebsart:	Erdgas	elektrisch

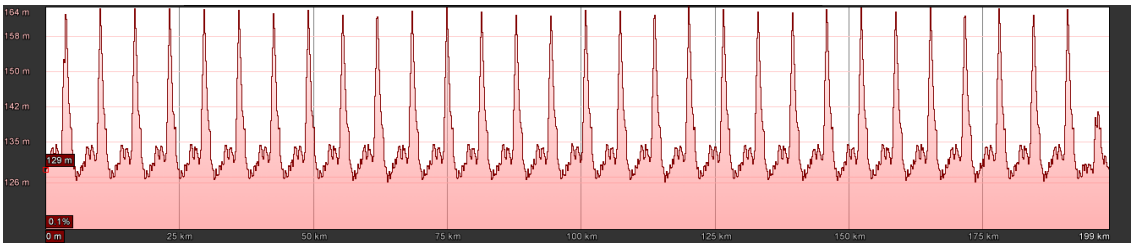
Liniennetzplan

Bildquelle: https://www.pvg-burgenlandkreis.de

VIII.2. Linienverlauf Linie 102

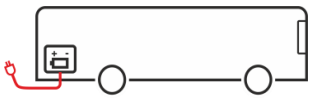
Linienverlauf Linien 101/102

Höhenprofil



VIII.3. Handlungsempfehlung Linie 102

Betrieblich-technische Bewertung



Standardbus, Volllader mit Zwischenladung - Betriebshof
Nachladung am Endpunkt Naumburg, City-Busstop und im Betriebshof
Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator (LiFePO4), Hochenergiebatterie, 150 kWh
Hybridheizung - Heizöl
Fahrerarbeitsplatz

Der einzusetzende Elektrobus ist als Volllader mit Zwischenladung zu konfigurieren. Der Elektrobus ist mit Hybridheizung sowie Klimaanlage für den Fahrerarbeitsplatz auszustatten.

Die Ladestrategie sieht eine Zwischenladung am Endpunkt Naumburg City-Busstopp / Betriebshof vor. Die Stromübertragung erfolgt über eine Ladestation in der Ausprägung als Plug-In-System CCS (AC/DC-Übertragung). Die Zwischenladung erfolgt während der Ladepause im Betriebshof zwischen 12:00 Uhr und 13.30 Uhr.

Neben der Nachladung während des Betriebes ist die Ladestation auf dem Betriebshof für das Laden über Nacht vorgesehen.

Fazit

Die Untersuchung der Linie 102 der PVG Burgenlandkreis erfolgte nach dem standardisierten Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV (BeSystO), auf Grundlage technischer, betrieblicher, betriebswirtschaftlicher und ökologischer Bewertungskriterien.

Betrieblich-technische Bewertung:
Der Betrieb der Linie 102 ist als Volllader mit Zwischenladung und Übernachtladung im Betriebshof beim Einsatz eines Energiespeichers von 150 kWh mit kleineren betrieblichen Änderungen möglich. Zur Realisierung des Betriebs wurde eine Zwischenladung von 90 Minuten im Betriebshof zwischen 12:00 Uhr und 13:30 Uhr in den Fahrplan eingepflegt. Ohne Einpflegen dieses Ladehalts wäre der Energiespeicher nahezu doppelt so groß zu dimensionieren, was Einschränkung bei der Mitnahmekapazität von Fahrgästen zur Folge hätte.

Wirtschaftliche Bewertung:
Im Middle-Case-Szenario ergeben sich ohne Förderung des Elektrobusses Kostenmehraufwände in Anschaffung und Betrieb gegenüber dem Referenzbus. Unter Berücksichtigung der Förderung und des betrachteten Einsatzzeitraums stellen die Anschaffung und der Betrieb des Elektrobussystems die wirtschaftlich günstigere Alternative dar.

Ökologische Bewertung:
Neben lokalen Einsparungen von Schadstoffemissionen (Tank-to-Wheel), können bei der Umsetzung des Elektrobussystems auf der für die ökologische Gesamtbilanzierung relevanten Well-to-Wheel-Kette hohe Einsparpotenziale hinsichtlich der Schadstoffemissionen erreicht werden.

Schlussfolgerung:
Die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf der Linie 102 konnte betrieblich-technisch nachgewiesen werden. Basierend auf der Auswahl des kritischen Umlaufes ist der Einsatz von Elektrobussen während des gesamten Wochenbetriebs mit kleineren betrieblichen Anpassungen möglich. Es ergeben sich unter Berücksichtigung der Förderung wirtschaftliche Vorteile bei Anschaffung und Betrieb des Elektrobussystems. Des Weiteren konnte ein hoher ökologischer Mehrwert nachgewiesen werden.

IX. PVGS - Personenverkehrsgesellschaft Altmarkkreis Salzwedel mbH

IX.1. Liniendaten Linie 1

Liniendaten

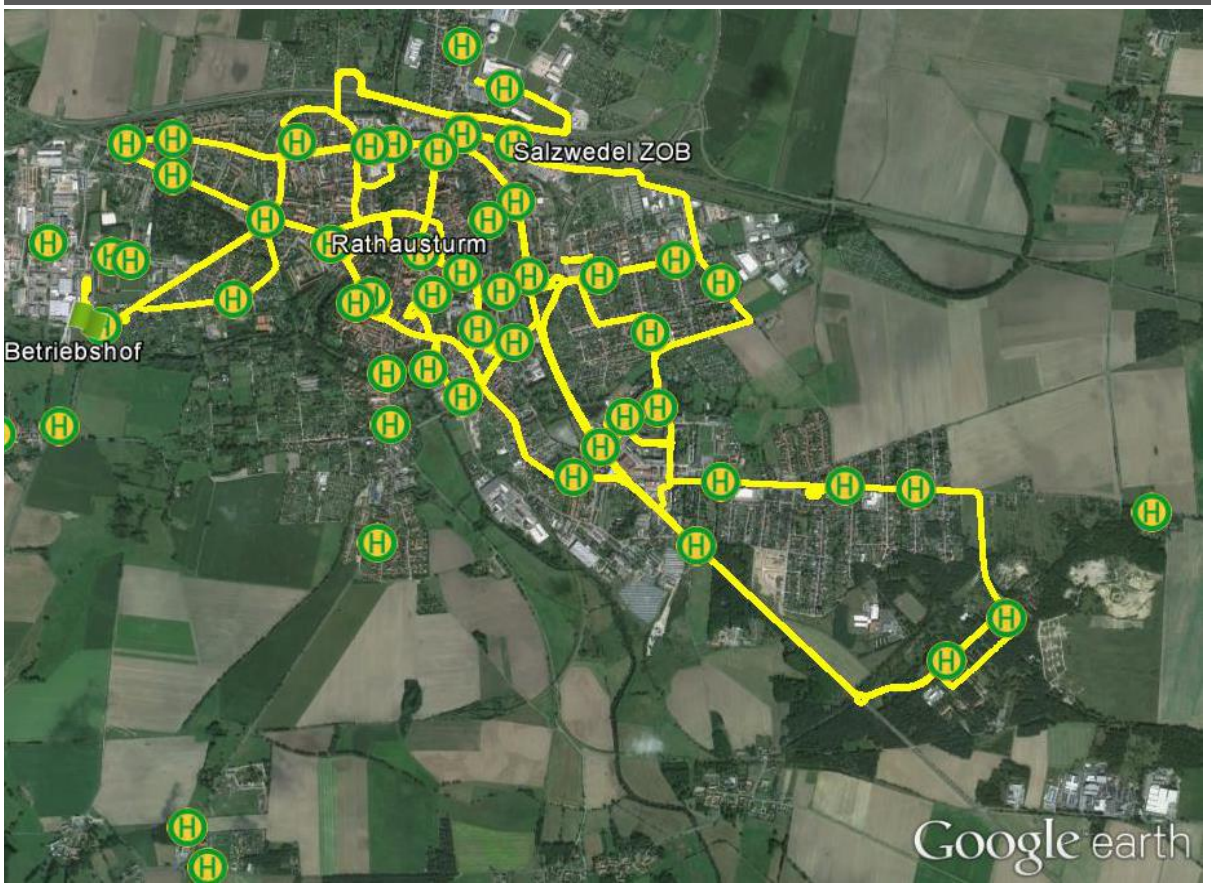
Linienverlauf:	City-Rufbus Salzwedel	
Linienlänge:	flexible Bedienform mit Bestellung	
Fahrzeit:	max. 00:30:00	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	26 km/h (flexibel ja nach Bediengebiet)	
Fahrzeugeinsatz:	IST	PLAN
Fahrzeuganzahl:	2	2
Fahrzeugtyp:	Minibus	Minibus
Fahrzeugklasse:	8 m	8 m
Antriebsart:	Diesel	elektrisch

Liniennetzplan

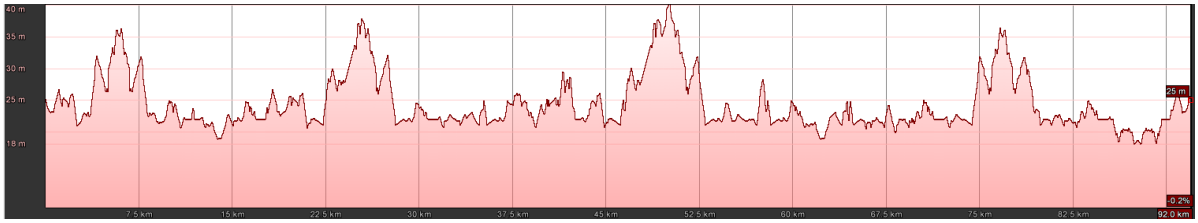
Bildquelle: http://www.pvgs-salzwedel.de/

IX.2. Linienverlauf Linie 1

Linienverlauf mit Haltestellen vom 14.12.2015

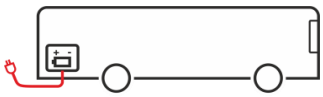


Höhenprofil vom Linienverlauf des 14.12.2015



IX.3. Handlungsempfehlung Linie 1

Betrieblich-technische Bewertung



Minibus, Volllader - Betriebshof
Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator (LiFePO4), Hochenergiebatterie, 95 kWh
Hybridheizung - Diesel
E-Bus Klimaanlage

Die einzusetzenden Elektrobusse sind als Volllader zu konfigurieren. Die Mini-Elektrobusse sind mit Hybridheizung sowie einer Klimaanlage für den Fahrgastraum auszustatten.

Die Auslegung der Ladepunkte erfolgte in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Ladezeit, der Batteriekapazität und der möglichen Nachladeleistung.

Die Ladestrategie sieht je Bus eine Langsamladestation auf dem Betriebshof für das Laden über Nacht vor. Die Energiezuführung erfolgt über das Plug-In-System CCS (AC/DC-Übertragung).

Fazit

Die Untersuchung der City-Rufbus-Linie der PVGS erfolgte nach dem standardisierten Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV (BeSystO), auf Grundlage technischer, betrieblicher, betriebswirtschaftlicher und ökologischer Bewertungskriterien.

Die PVGS repräsentiert den einzigen Einsatzfall eines Elektrobussytems mit Minibussen innerhalb der Gesamtuntersuchung der NASA.

Betrieblich-technische Bewertung:
Der Betrieb der City-Rufbus-Linie ist als Volllader mit Einsatz eines Energiespeichers von 95 kWh ohne betriebliche Anpassungen möglich.

Wirtschaftliche Bewertung:
Im Middle-Case-Szenario ergeben sich ohne Förderung des Elektrobusses Kostenmehraufwände in Anschaffung und Betrieb gegenüber dem Referenzbus. Unter Berücksichtigung der Förderung und des betrachteten Einsatzzeitraums stellen die Anschaffung und der Betrieb des Elektrobussystems die wirtschaftlich günstigere Alternative dar.

Ökologische Bewertung:
Neben lokalen Einsparungen von Schadstoffemissionen (Tank-to-Wheel), können bei der Umsetzung des Elektrobussystems auf der für die ökologische Gesamtbilanzierung relevanten Well-to-Wheel-Kette hohe Einsparpotenziale hinsichtlich der Schadstoffemissionen erreicht werden.

Schlussfolgerung:
Die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf der City-Rufbus-Linie konnte betrieblich-technisch nachgewiesen werden. Basierend auf der Auswahl des kritischen Umlaufes ist der Einsatz von Elektrobussen im gesamten Wochenbetrieb ohne betriebliche Anpassungen möglich. Es ergeben sich unter Berücksichtigung der Förderung wirtschaftliche Vorteile bei Anschaffung und Betrieb des Elektrobussystems. Des Weiteren konnte ein hoher ökologischer Mehrwert nachgewiesen werden.

X. Stendalbus - Regionalverkehr Westsachsen GmbH (RVW)

X.1. Liniendaten Linie 901

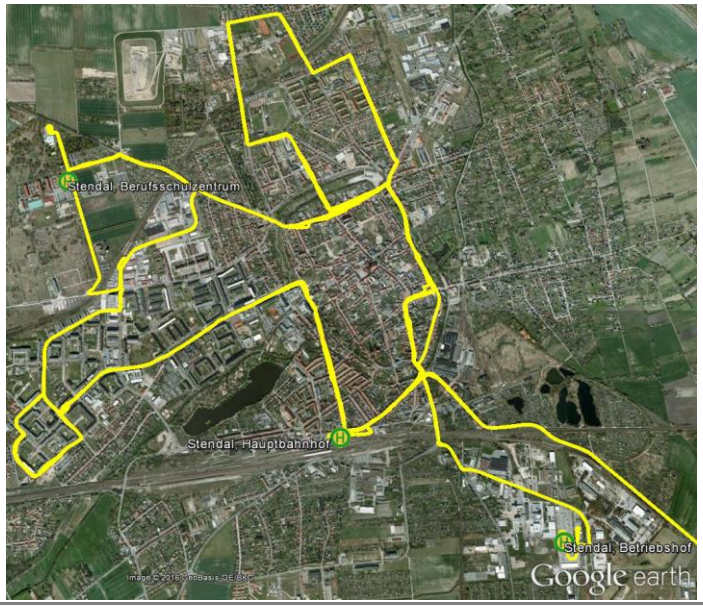
Liniendaten		
Linienverlauf:	Hbf - Galgenberg - Stadtsee - Hbf	
Linienlänge:	16,3 km	
Fahrzeit:	00:49:00	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	20 km/h	
Fahrzeugeinsatz:	IST	PLAN
Fahrzeuganzahl:	3	3
Fahrzeugtyp:	Standardbus	Standardbus
Fahrzeugklasse:	12 m	12 m
Antriebsart:	Diesel	elektrisch

Liniennetzplan

Bildquelle: http://www.stendalbus.de/

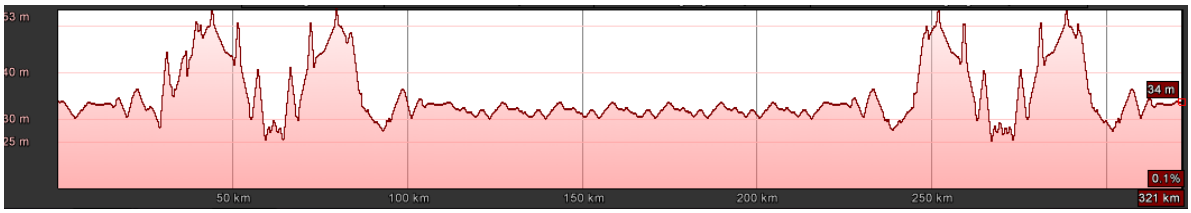
X.2. Linienverlauf Linie 901

Linienverlauf Stadtverkehr Linie 901



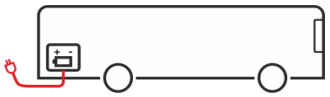
Linienverlauf Stadtverkehr Linie 901 und Regionalverkehr Havelberg

Höhenprofil Linienverlauf Stadtverkehr Linie 901 und Regionalverkehr Havelberg



X.3. Handlungsempfehlung Linie 901

Betrieblich-technische Bewertung



Standardbus, Volllader mit Zwischenladung im Betrieb
Nachladung am Endpunkt Stendal, Hauptbahnhof / Havelberg, Busbahnhof und im Betriebshof
Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator (LiFePO4), Hochenergiebatterie, 210 kWh
Hybridheizung - Heizöl
Fahrerarbeitsplatz

Die einzusetzenden Elektrobusse sind als Volllader mit Zwischenladung zu konfigurieren. Die Elektrobusse sind mit Hybridheizung sowie Klimaanlage für den Fahrerarbeitsplatz auszustatten.

Die Auslegung der Ladepunkte erfolgt in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Ladezeit, der Batteriekapazität und der möglichen Nachladeleistung.

Die Ladestrategie sieht je einen Ladepunkt zur Zwischenladung an den Endpunkten Stendal, Hauptbahnhof und Havelberg, Busbahnhof vor. Des Weiteren erfolgt eine Zwischenladung während der Pausenzeiten im Betriebshof. Die Energiezuführung erfolgt über das Plug-In-System CCS (AC/DC-Übertragung).

Neben der Zwischenladung während des Betriebes ist je Bus eine Langsamladestation auf dem Betriebshof für das Laden über Nacht vorgesehen. Die Energiezuführung erfolgt über das AC/DC-Ladesystem (Plug-In-System CCS).

Fazit

Die Untersuchung der Linie 901 des Stendalbus erfolgte nach dem standardisierten Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV (BeSystO), auf Grundlage technischer, betrieblicher, betriebswirtschaftlicher und ökologischer Bewertungskriterien.

Betrieblich-technische Bewertung:
Der Betrieb der Linie 901 ist als Volllader mit Zwischenladung an den Endpunkten Stendal, Hbf und Havelberg, Busbahnhof und Übernachtladung im Betriebshof beim Einsatz eines Energiespeichers von 210 kWh ohne betriebliche Anpassungen möglich, wobei die Zwischenladung an zwei unterschiedlichen Endpunkten mit teils nur geringer Wendezeit betrieblich nicht empfohlen wird. Eine Wendezeitverlagerung wäre sinnvoll.

Wirtschaftliche Bewertung:
Im Middle-Case-Szenario ergeben sich ohne Förderung des Elektrobusses Kostenmehraufwände in Anschaffung und Betrieb gegenüber dem Referenzbus. Unter Berücksichtigung der Förderung und des betrachteten Einsatzzeitraums stellen die Anschaffung und der Betrieb des Elektrobussystems weiterhin einen zwar geringen aber existenten Kostenmehraufwand dar.

Ökologische Bewertung:
Neben lokalen Einsparungen von Schadstoffemissionen (Tank-to-Wheel), können bei der Umsetzung des Elektrobussystems auf der für die ökologische Gesamtbilanzierung relevanten Well-to-Wheel-Kette hohe Einsparpotenziale hinsichtlich der Schadstoffemissionen erreicht werden.

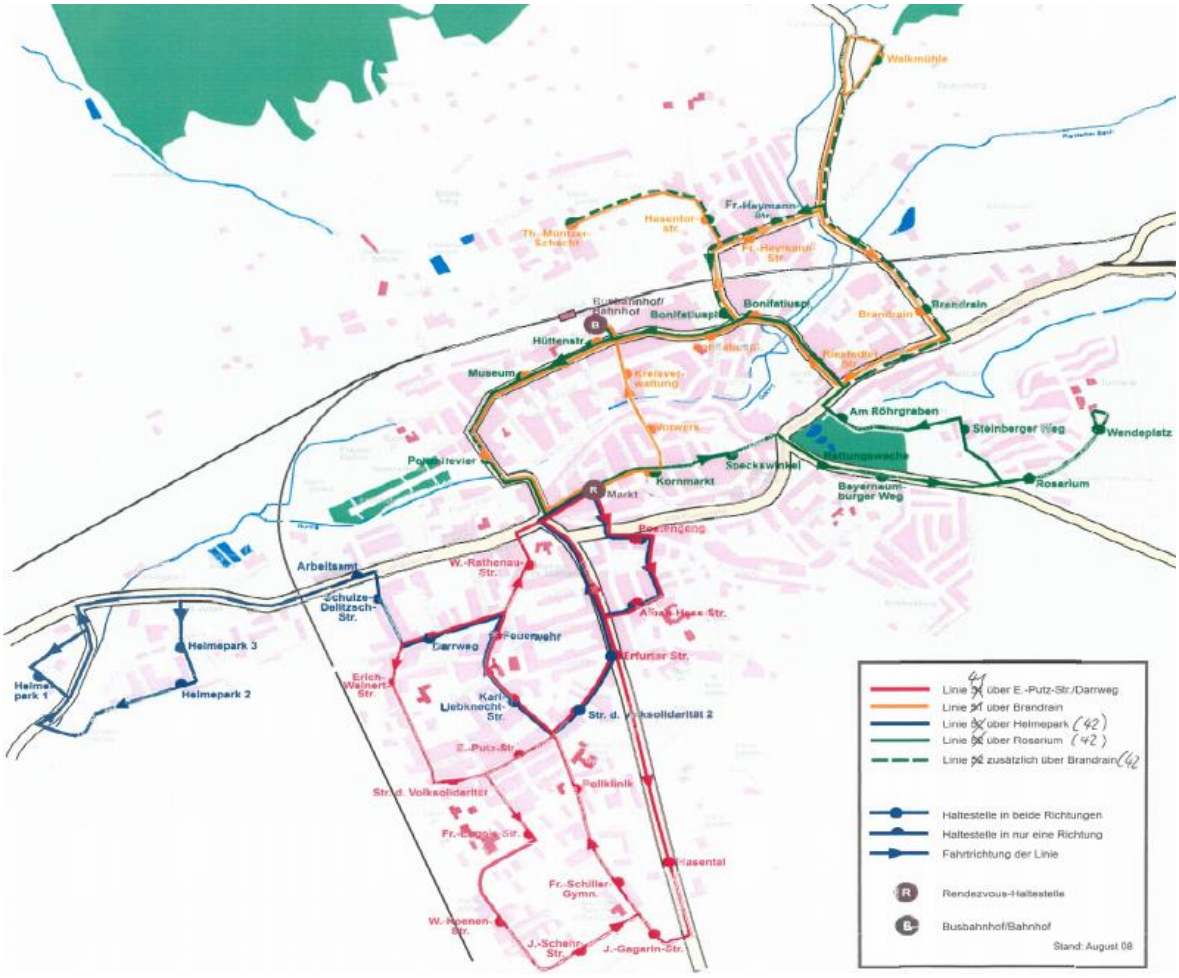
Schlussfolgerung:
Die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf der Linie 901, inklusive aller Fahrten im Regionalverkehr, konnte technisch nachgewiesen werden. Tendenziell sollte aus betrieblichen Gründen jedoch über Verlagerungen von Wendezeiten nachgedacht werden. Dies könnte weiterführende wirtschaftliche Einsparungen zufolge haben, da das derzeit konfigurierte Elektrobussystem weder ohne noch mit Förderung wirtschaftlich günstiger oder gleichwertig ist. Auch der Einsatz eines Hybridbusses sollte weiterführend untersucht werden. Es konnte ein hoher ökologischer Mehrwert nachgewiesen werden.

XI. VGS - Verkehrsgesellschaft Südharz mbH

XI.1. Liniendaten Linie 41

Liniendaten		
Linienverlauf:	Stadtbus Sangerhausen	
Linienlänge:	ca. 7 km (variiert je nach Kursweg)	
Fahrzeit:	ca. 00:25:00 (variiert je nach Kursweg)	
Ø Geschwindigkeit Fahrplan:	18 km/h	
Fahrzeugeinsatz:	IST	PLAN
Fahrzeuganzahl:	3	3
Fahrzeugtyp:	Standardbus	Standardbus
Fahrzeugklasse:	12 m	12 m
Antriebsart:	Diesel	elektrisch

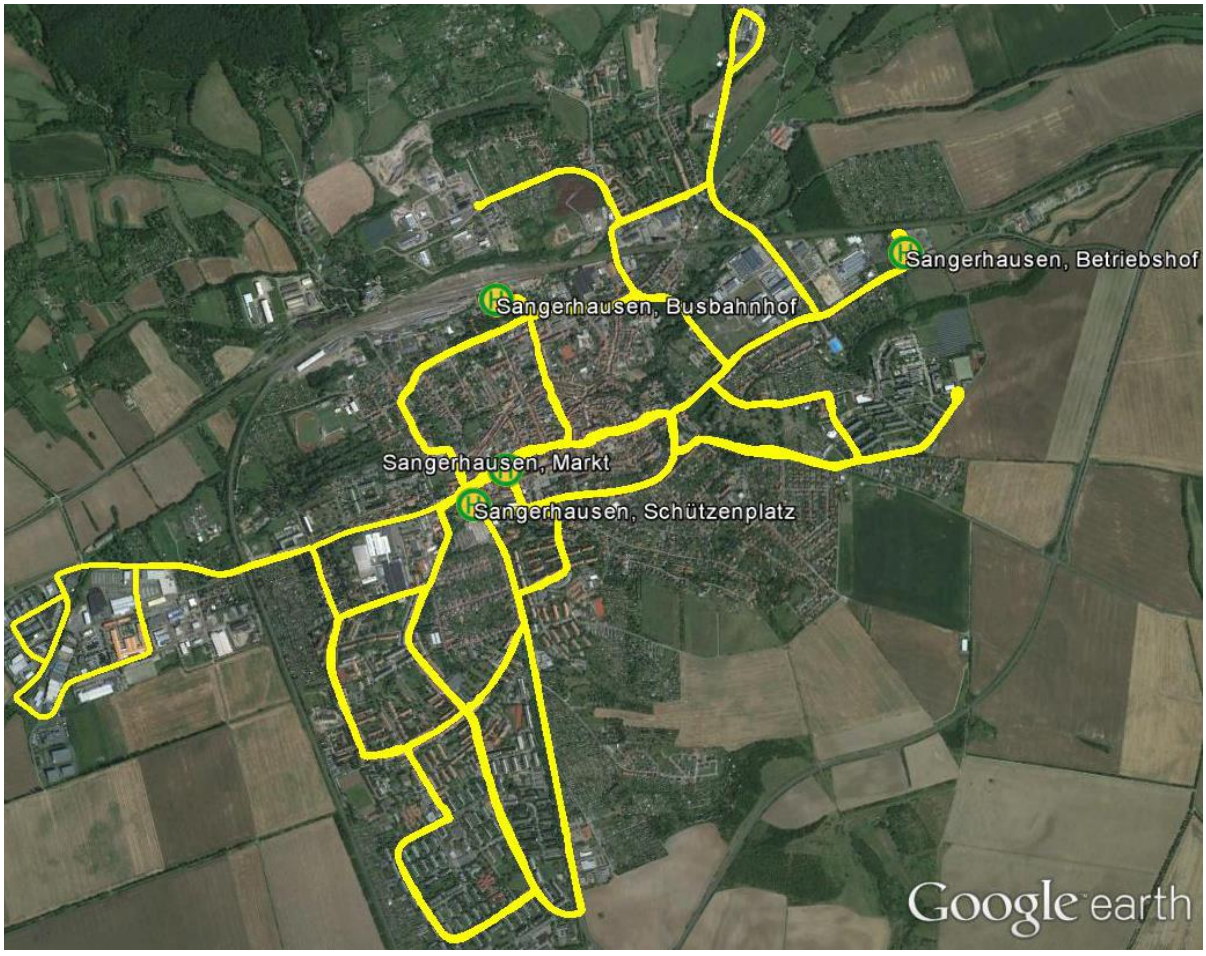
Liniennetzplan



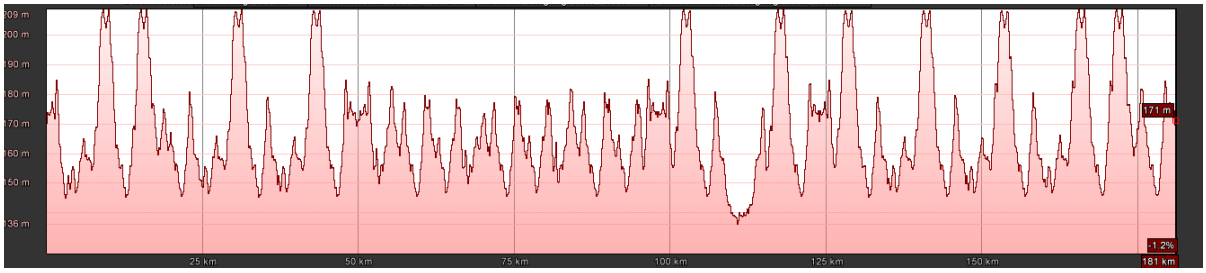
Bildquelle: VGS

XI.2. Linienverlauf Linie 41

Linienverlauf Linie 41 (Umlauf 515 / 516)

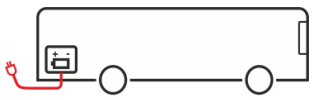


Höhenprofil Umlauf 515 / 516



XI.3. Handlungsempfehlung Linie 41

Betrieblich-technische Bewertung



Standardbus, Volllader mit Zwischenladung im Betrieb
Nachladung am Endpunkt Sangerhausen, Markt und im Betriebshof
Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator (LiFePO4), Hochenergiebatterie, 120 kWh
Hybridheizung - Heizöl
Fahrerarbeitsplatz

Die einzusetzenden Elektrobusse sind als Volllader mit Zwischenladung zu konfigurieren. Die Elektrobusse sind mit Hybridheizung sowie Klimaanlage für den Fahrerarbeitsplatz auszustatten.

Die Auslegung der Ladepunkte erfolgt in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Ladezeit, der Batteriekapazität und der möglichen Nachladeleistung.

Die Ladestrategie sieht einen ladepunkt zur Zwischenladung am Endpunkt Sangerhausen, Markt sowie während der Pausenzeiten im Betriebshof vor. Die Energiezuführung erfolgt über ein Plug-In-System CCS (AC/DC-Übertragung).

Neben der Zwischenladung während des Betriebes ist je Bus eine Langsamladestation auf dem Betriebshof für das Laden über Nacht vorgesehen. Die Energiezuführung erfolgt über ein Plug-In-System CCS (AC/DC-Übertragung). Die Wartung der Busse erfolgt im Betriebshof Hettstedt. Folglich ist dort eine zusätzliche Ladestation vorzusehen.

Fazit

Die Untersuchung der Linie 41 der VGS erfolgte nach dem standardisierten Bewertungsverfahren für Systeminnovationen im ÖPNV (BeSystO), auf Grundlage technischer, betrieblicher, betriebswirtschaftlicher und ökologischer Bewertungskriterien.

Betrieblich-technische Bewertung:
Der Betrieb der Linie 41 ist als Gelegenheitslader mit Ladung am Endpunkt Sangerhausen, Markt, während der Pausenzeiten im Betriebshof sowie mit Übernachtladung im Betriebshof beim Einsatz eines Energiespeichers von 120 kWh ohne betriebliche Anpassungen möglich.

Wirtschaftliche Bewertung:
Im Middle-Case-Szenario ergeben sich ohne Förderung des Elektrobusses Kostenmehraufwände in Anschaffung und Betrieb gegenüber dem Referenzbus. Unter Berücksichtigung der Förderung und des betrachteten Einsatzzeitraums stellen die Anschaffung und der Betrieb des Elektrobussystems die wirtschaftlich günstigere Alternative dar.

Ökologische Bewertung:
Neben lokalen Einsparungen von Schadstoffemissionen (Tank-to-Wheel), können bei der Umsetzung des Elektrobussystems auf der für die ökologische Gesamtbilanzierung relevanten Well-to-Wheel-Kette hohe Einsparpotenziale hinsichtlich der Schadstoffemissionen erreicht werden.

Schlussfolgerung:
Die Umsetzung des Elektrobusbetriebs auf der Linie 41 konnte betrieblich-technisch nachgewiesen werden. Basierend auf der Auswahl des kritischen Umlaufes ist der Einsatz von Elektrobussen im gesamten Wochenbetrieb ohne betriebliche Anpassungen möglich. Es ergeben sich unter Berücksichtigung der Förderung wirtschaftliche Vorteile bei Anschaffung und Betrieb des Elektrobussystems. Des Weiteren konnte ein hoher ökologischer Mehrwert nachgewiesen werden.