



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

Leitfaden Flottenelektrifizierung für Busbetriebe

Schlussbericht



Christine Schulz-Dübi

Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) / Busbetrieb Solothurn und Umgebung (BSU)

Tiefenaustrasse 2, 3048 Worblaufen, christine.schulz@rbs.ch

Roman Zürcher

Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) / Busbetrieb Solothurn und Umgebung (BSU)

Tiefenaustrasse 2, 3048 Worblaufen, roman.zuercher@rbs.ch

Mareike Otte

VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH

Könneritzstrasse 31, DE-01067 Dresden, mareike.otte@vcdb.de, www.vcdb.de

Jan Schwarzenberger

VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin GmbH

Könneritzstrasse 31, DE-01067 Dresden, jan.schwarzenberger@vcdb.de, www.vcdb.de

Impressum

Herausgeberin:
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)
CH-3003 Bern

Programmleiter
Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: P-144
Bezugsquelle
Kostenlos zu beziehen über das Internet
www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor –in oder sind ausschliesslich die Autoren –
innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 07.11.2019

Inhalt

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	4
1. Ausgangslage.....	4
2. Ziel der Arbeit	4
3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand.....	5
4. Ergebnisse.....	5
5. Diskussion	14
6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	15
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	16
Literaturverzeichnis	16

Zusammenfassung

Die Elektromobilität wird in den nächsten Jahren zunehmend auch in kleineren und mittleren Busbetrieben Einzug halten, was die entsprechenden Betriebe vor grosse betriebliche und finanzielle Herausforderungen stellen wird. Der Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) und der Busbetrieb Solothurn und Umgebung (BSU) haben sich dieser Aufgabe gestellt und zeigen auf, welche konkreten Schritte unternommen werden müssen, um ihre Dieselbusflotten komplett auf Elektrobusse umzustellen. Diese Erkenntnisse wurden in einem separaten Leitfaden zusammengefasst, welcher allen interessierten Kreisen für den Wissenstransfer zur Verfügung steht. Der Leitfaden gibt einen guten Überblick über die aktuellen Grundlagen der Fahrzeuge und Ladetechnologien und zeigt auf, welche Arbeitsschritte zur Wahl des richtigen Ladekonzepts durchgeführt werden müssen. Zusätzlich werden Handlungsempfehlungen abgegeben, wie die zusätzliche Ladeinfrastruktur im Busdepot oder an den Streckenladepunkten dimensioniert werden sollte und welche Softwaremodule in die IT-Systemlandschaft eingefügt werden müssen, damit die Einsatzbereitschaft der gesamten E-Busflotte jederzeit gewährleistet bleibt. Ein Musterlastenheft erleichtert es den Transportunternehmen Fahrzeuge inklusive der notwendigen Ladeinfrastruktur zu beschaffen. Im Teil «Finanzierung» wird schliesslich in unterschiedlichen Szenarien aufgezeigt, wie hoch Kosten für den Technologieschritt ausfallen. Am Beispiel der Busflotten von RBS und BSU lässt sich mit diesen Zahlen eine ökologische Bewertung durchführen und eine Aussage über die Höhe der externen Kosten treffen.

Résumé

L'électromobilité s'imposera de plus en plus ces prochaines années dans les services de bus, même petits ou moyens, ce qui constitue pour ces prestataires un important défi opérationnel et financier. La société « Regionalverkehr Bern-Solothurn » (RBS) et « Busbetrieb Solothurn und Umgebung » (BSU) ont relevé ce défi et montré quelles sont les étapes concrètes à suivre pour changer intégralement une flotte de bus diesel en un parc de véhicules électriques. Ces mesures sont résumées dans un manuel séparé qui est mis à disposition de tous les cercles intéressés comme outil de transfert des connaissances. Ce manuel constitue une bonne synthèse de la situation actuelle en termes de véhicules et de technologies de charge et montre quelles sont les étapes à suivre pour définir le concept de chargement approprié. Il émet en outre des recommandations quant au dimensionnement l'infrastructure de recharge au dépôt de bus ou aux bornes de recharge sur le parcours et explique quels modules logiciels doivent être intégrés au système informatique pour garantir en tout temps la disponibilité de l'intégralité de la flotte de bus électriques. Un modèle de cahier des charges simplifié pour les entreprises de transport l'acquisition des véhicules, y compris l'infrastructure de recharge nécessaire. Pour terminer, la partie « Financement » présente à travers divers scénarios les coûts que représente ce pas technologique. Sur l'exemple des flottes de bus RBS et BSU, ces chiffres permettent d'effectuer une analyse écologique et de se prononcer sur le montant des coûts externes.

Summary

Over the next few years, electric mobility will increasingly find its way into small and medium-sized bus companies, which will pose major operational and financial challenges for these companies. The «Regionalverkehr Bern-Solothurn» (RBS) and the «Busbetrieb Solothurn und Umgebung» (BSU) have set themselves this task and show what concrete steps have to be taken to convert their diesel bus fleets completely to electric buses. These findings were summarised in a separate guideline, which is available to all interested parties for the transfer of knowledge. The guide provides a good overview of the current fundamentals of vehicles and charging technologies and shows which work steps must be carried out to select the right charging concept. In order to guarantee the operational readiness of the entire e-bus fleet, recommendations are given as to how the additional charging infrastructure at the depot or at the line charging points should be dimensioned and which software modules must be integrated into the IT system landscape. A model specification sheet makes it easier for the transport companies to procure vehicles including the necessary charging infrastructure. Finally, in the «Financing» section, various scenarios show how high the costs for the technological step are. Using the example of the bus fleets of RBS and BSU, these figures allow to carry out an ecological assessment and to make a statement about the level of external costs.

1. Ausgangslage

Der Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) und der Busbetrieb Solothurn und Umgebung (BSU) sind zwei im Grossraum Bern und Solothurn tätige Unternehmen, welche je eine Dieselflotte von über 40 Fahrzeugen betreiben. Beide Unternehmen stehen vor der Ausgangslage, dass in den kommenden Jahren Dieselbusse durch Elektrobusse ersetzt werden sollen, damit die firmeneigenen Klimaziele erfüllt werden können.

Mit der Einführung von Elektrobussen sind tiefgreifende Technologieumstellungen zu erwarten. Es ergeben sich zahlreiche Fragestellungen, die rechtzeitig vor dem Beginn des Transformationsprozesses beantwortet werden müssen. Konkret gilt es Antworten auf folgende Fragestellungen zu finden:

- Welches Elektrobussystem (Voll- oder Gelegenheitslader) ist für die jeweilige Buslinie respektive für das gesamte Busnetz am zweckmässigsten?
- Welche Betriebsprozesse und welche Schnittstellen müssen angepasst werden?
- Welche Qualifizierungen müssen Fahr- und Werkstattpersonal künftig erfüllen?
- Wie muss die Ladeinfrastruktur dimensioniert werden, wieviel Platz wird dafür benötigt und welche Anforderungen hat die Umstellung auf Elektrobusbetrieb auf die Abstellkapazitäten und die Werkstattausstattung?
- Welche Kriterien müssen für die Ausschreibung eines Elektrobussystems beachtet werden und mit welchen Mehrkosten ist aktuell gegenüber einer reinen Dieselflotte zu rechnen?

2. Ziel der Arbeit

Die allgemeingültigen Erkenntnisse aus der Analyse der beiden Busbetriebe RBS und BSU werden in einem separaten Leitfaden [1] zusammengefasst und publiziert, damit ein praxisnaher Wissenstransfer möglich ist. Der Leitfaden formuliert Handlungsempfehlungen für die Teilbereiche «Netzanalyse und Ladestrategie», «Infrastrukturkonzept», «Betriebskonzept», «Submission» und «Finanzierung». Der Leitfaden richtet sich an alle interessierten Transportunternehmen, welche vor der Herausforderung der Umstellung auf Elektrobusbetrieb stehen.

Für politische Entscheidungsträgerinnen und -träger sind neben den rein technischen Abhandlungen vor allem die dargestellten Kostenvergleiche und die externen Kosten in Bezug auf die Umweltauswirkungen von Elektrobussen und konventionellen Dieselflotten von Interesse.

3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

Aktuelle Betriebsdaten der beiden Busbetriebe bilden die Grundlage für die Praxisbeispiele. Auf Basis dieser Daten kann abgeleitet werden, welcher Energiebedarf notwendig ist, wie lange allfällige Ladezeiten an den Endpunkten sind und welche Ladestrategie schliesslich für die entsprechende Linie sinnvoll ist. Dabei wird der aktuelle Stand der Technik hinsichtlich Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur abgebildet.

Der Fokus der Studie richtet sich auf Batterieelektrobusse. Alternative chemische Energieträger wie Wasserstoff, Biogas oder Biotreibstoffe werden in dieser Untersuchung nicht betrachtet.

Die Kostenbetrachtung wird auf Basis der Kapitalwertmethode durchgeführt, wobei für deren Berechnung reale Daten von RBS und BSU berücksichtigt sind. Für den Vergleich von konventionellen Dieselnissen und Elektrobussen fliessen sämtliche Investitions- und Betriebskosten in die Kostenberechnung ein.

Die derzeit am Markt verfügbaren Systeme sind noch nicht geeignet, die Anforderungen der beiden untersuchten Busbetriebe vollständig zu erfüllen. Allerdings sind in Zukunft weiterhin Technologieentwicklungen bei Kosten und Reichweiten zu erwarten. Auch wegen der hohen Kosten und des Markthochlaufs neuer Bussysteme wird deswegen von einem schrittweisen Umstieg auf neue Antriebskonzepte ausgegangen. Dies schliesst einen zeitweisen Parallelbetrieb mit Dieselnissen ein.

4. Ergebnisse

Die detaillierten Resultate sind im Leitfaden [1] publiziert, welcher auf der BAV-Website separat heruntergeladen werden kann. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Studie kurz zusammengefasst:

4.1 Technologische Grundlagen

4.1.1 Ladekonzepte

Bei Batteriebusen wird die Reichweite grundsätzlich durch die zur Verfügung stehende elektrische Energiespeicherkapazität bestimmt. Entsprechend der Liniencharakteristik (Umlauflänge, Einsatzzeit, Topographie, Fahrcharakteristik, Verspätungssituation etc.) werden das Betriebskonzept und die Ladestrategie definiert. Batteriebusse werden entsprechend der Ladestrategie und somit der Batteriekapazität in Voll- und Gelegenheitslader kategorisiert.

Einen weiteren signifikanten Einfluss auf die Energiebilanz haben Nebenaggregate, wie beispielsweise die elektrische Klimatisierung.

Volllader

Ist die Kapazität des Energiespeichers im Fahrzeug für einen ganzen Tageseinsatz ausgelegt, so handelt es sich um einen Volllader (engl. Overnight Charger). Die Nachladung der im Vergleich zum Gelegenheitslader grösseren Energiespeicher erfolgt an zentralen Punkten während der Betriebspause, vorzugsweise in der Einstellhalle.

Vorteile von Vollladern:

- Volllader sind nicht an externe Ladeinfrastrukturen gebunden und können daher flexibel eingesetzt werden.
- Die Fahrzeuge müssen nicht minimale Endaufenthaltszeiten einhalten, um aufgeladen werden zu können. Dies wirkt sich positiv auf die Betriebsstabilität aus und unter Umständen kann auf den Einsatz von zusätzlichen Fahrzeugen verzichtet werden.
- Die zeitlich ausgedehnte stationäre Ladung mit moderater Leistung schont die Speicherzellen und wirkt sich positiv auf die Lebensdauer von Akkumulatoren aus.

Nachteile von Vollladern:

- Die verfügbaren Reichweiten von 150-250 km liegen deutlich unter denjenigen von Dieselsebussen. Dadurch müssen bei längeren Umläufen Fahrzeugwechsel eingeplant werden.
- Gegenüber Gelegenheitsladern müssen mehr Batterien mitgeführt werden, was u.U. die Kosten erhöht, die Fahrgastkapazität reduziert und zusätzlich aus Umweltüberlegungen nachteilig gewertet werden muss.
- Das gleichzeitige Laden von Vollladern im Depot erfordert ein Lademanagement, um Lastspitzen zu vermeiden.
- Strom aus erneuerbaren Energieträgern fällt in der Regel tagsüber an und nicht während der nächtlichen Ladephase.

Gelegenheitslader

Der Gelegenheitslader (engl. Opportunity Charger) verfügt über einen kleineren Energiespeicher, welcher nicht für einen kompletten Tageseinsatz ausgelegt ist. Der Energiespeicher muss während des Linieneinsatzes auf der Strecke nachgeladen werden. Im Gegensatz zum Volllader mit Zwischenladung kommen hohe Ladeleistungen und oft auch ein eigens hierfür vorgesehene Ladesystem (z. B. Docking-Station) zur Anwendung.

Vorteile von Gelegenheitsladern:

- Der Einsatz kleinerer Energiespeicher wirkt sich positiv auf das Gesamtfahrzeug aus: Diese haben ein geringeres Gewicht, nehmen weniger Raum in Anspruch und sind kostengünstiger in der Anschaffung.

Nachteile von Gelegenheitsladern:

- Durch die hohen Ladeleistungen werden Akkumulatoren stärker beansprucht, was sich u. a. negativ auf die Lebensdauer auswirken kann.
- An den Linienendpunkten müssen zur Wahrung der Betriebssicherheit gewisse Ladezeiten sichergestellt werden müssen. Die Wendezeiten an Linienendpunkten dienen häufig dem Verspätungsausgleich und müssen dementsprechend verlängert werden, um eine ausreichende Ladung und somit die erforderliche Reichweite der Fahrzeuge zu ermöglichen.
- Auf dem Liniennetz müssen zusätzlichen Ladestationen installiert werden, was sich negativ auf die Kosten auswirkt. Zudem sind Ladestationen nicht überall bewilligungsfähig.
- Nachträgliche Änderungen von Angebotskonzepten können nicht mehr kurzfristig erfolgen, sondern bedingen eine lange Planungsphase. Dadurch verlieren Bussysteme viel von der heutigen Flexibilität.

Energiezuführung

Für die Zuführung der elektrischen Energie ist ein Kontaktsystem erforderlich. Im Bereich der Elektrobusse sind hierfür folgende Technologien verfügbar:

- Stationäre, konduktive Ladung (z. B. Docking-System, Plug-In-System, Ladepunkt Oberleitung)
- Stationäre, induktive Ladung (z. B. Induktionsschleife / Pick-Up)
- Dynamische, konduktive Ladung (z. B. Oberleitung)
- Chemische Energiezuführung (z. B. Tanken von Wasserstoff)

Fahrzeugseitiges Ladegerät

Bei der Plug-In-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 eines Elektrofahrzeuges wurden durch die International Electrotechnical Commission in der Norm IEC 62196 die Lademodi 1 bis 3 für AC/AC-Ladung (beschrieben in der IEC 61851-1) inklusive der zugehörigen Steckverbinder definiert.

Externes Ladegerät (Plug-In-System)

Durch die International Electrotechnical Commission sind in der Norm IEC 62196 ebenfalls der Lademodus für AC/DC-Ladung inklusive der zugehörigen Steckverbinder definiert. Das AC/DC-Plug-In-System wird grundsätzlich für das Laden in der Betriebsruhe verwendet, d. h. für das Übernachten (Overnight Charging).

Die DC-high-Ladung nutzt in Europa die Ladeschnittstelle Combo Typ 2 (auch kurz Combo 2), welche eine Erweiterung der üblichen Typ-2-Verbindung um zwei zusätzliche DC-Kontakte darstellt. Die maximale Ladespannung beträgt derzeit für den Combo-2-Stecker 850 V_{DC}, der maximale Ladestrom 200 A und die Maximalladeleistung dementsprechend 170 kW_{DC} (IEC 62196-3).

Docking-Station

Bei stationärer, konduktiver Energiezuführung mittels Docking-Station wird der fahrzeugseitige Energiespeicher in der Regel an punktuell im Linienverlauf installierten Ladestationen nachgeladen. Das Nachladen erfolgt auf der Strecke während planmässiger Fahrzeugstopps an Wendepunkten und oder Haltestellen (Gelegenheitsladung). Für die Ladung in der Betriebspause ist in jedem Fall eine zusätzliche Lademöglichkeit im Depot vorzusehen, sodass hier ein einheitliches System mit kompatiblen Docking-Stationen sinnvoll ist.

Das Spannungs- und Leistungsniveau ist nicht vorgegeben und richtet sich nach dem jeweiligen Anwendungsfall. Im Allgemeinen liegen die Spannungsparameter im Bereich von 400 V_{DC} bis 850 V_{DC}, wobei auf Seiten der Ladetechnik teilweise Ausgangsspannungen von 150 V_{DC} bis 920 V_{DC} unterstützt werden, und Ladeleistungen von 150 kW_{DC} bis 600 kW_{DC}.

Ein Stromabnehmer zur Kontaktherstellung erlaubt den Ladevorgang mit hoher Ladeleistung vollautomatisch und in kürzester Zeit durchzuführen. Je nach Kopplungsrichtung wird zwischen folgenden Ausführungsvarianten unterschieden:

- Hub-Docking-Station: Stromabnehmer auf dem Fahrzeugdach (Engl. on-board bottom-up pantograph), Hub bis 2,2 m
- Seiten-Docking-Station: Stromabnehmer an der Ladestation, Kontaktherstellung auf der Fahrzeugseite
- Senk-Docking-Station: Stromabnehmer an der Ladestation (Engl. off-board top-down pantograph), Hub bis 2,5 m

4.1.2 Elektrochemische Energiespeicher

Für den Einsatz von Elektrobussen werden derzeit vorwiegend Energiespeicher zweier unterschiedlicher chemischer Zusammensetzungen verwendet. Einerseits sind dies Lithium-Titanat-Akkumulatoren (LTO) und andererseits Lithium-Eisenphosphat-Akkumulatoren (LiFePO₄). Prinzipiell werden elektrische Energiespeicher unabhängig von der Zellchemie in Hochleistungs- und Hochenergiebatterien unterschieden.

Die Reichweite dieser Energiespeicher ist zum heutigen Zeitpunkt unter Betriebsbedingungen noch auf rund 150 bis 200 Kilometer beschränkt. Es ist davon auszugehen, dass die Reichweite in Zukunft noch etwas erhöht werden kann, aber Quantensprünge sind nicht zu erwarten. Grössere Reichweiten sind mit sogenannten Range Extendern zu erwarten, welche zusätzliche Energie mit Hilfe von Brennstoffzellensystemen liefern können. Vor 2024 sind solche Systeme voraussichtlich noch nicht marktreif.

4.2 Anforderungsprofil

Zur Erstellung eines Anforderungsprofils ist eine umfassende Datenaufnahme mit allen kundenspezifischen Anforderungen aufzunehmen. Dabei erfolgt eine umfassende Bestandsaufnahme (Flotte, Infra-

strukturen) sowie die Aufnahme betrieblicher, verkehrlicher und wirtschaftlicher Basisdaten, die als Parameter in die energetischen und wirtschaftlichen Untersuchungen eingehen. Diese Daten können nicht händisch ausgewertet werden, sondern hierfür ist spezialisierte Software für die Analyseschritte notwendig.

Neben Soll-daten (Liniennetzpläne, Bildfahrpläne und Umlaufdaten) sind auch Ist-Daten für die Analyse notwendig. Zur Bestimmung des Fahr- und Höhenprofils müssen die Linien im realen Betriebsalltag vermessen werden, um für die ausgewählten Umläufe alle erforderlichen Parameter unter verkehrlichen und betrieblichen Realbedingungen zu berechnen. Ebenfalls wichtig für die Auslegung der Ladeinfrastruktur von Unterwegsladesystemen sind reale Verspätungsdaten, welche von Vorteil aus Leitsystemen gewonnen werden können.

Damit weg- und zeitabhängige Energiebedarfswerte berechnet werden können, müssen die spezifischen betrieblichen (Servicezeiten, Ein- und Ausrückfahrten, Wendezeiten, Verspätungslage, Fahrgastaufkommen), topographischen und verkehrlichen Belange (Anzahl Halte je Kilometer, Haltezeitanteil, Durchschnittsgeschwindigkeit gemäss SORT-Klassifizierung) beachtet werden.

Die Fahrzeuge müssen gemäss den gesetzlichen Vorgaben konfiguriert werden und maximal zulässige Gesamtgewichte oder Achslasten nicht überschreiten. Die Vor- und Nachteile von Radnaben- oder Zentralmotoren sind gegeneinander abzuwägen. Einen wichtigen Einfluss auf die Reichweite haben Klima- und Heizungsanlagen. Im Vorfeld einer Beschaffung sind deshalb diese Fragen zu klären.

4.3 Netzanalyse und Strategie

Die Umlaufanalyse und Energiebilanzierung ist der wichtigste Schritt, um Empfehlungen für die schrittweise Elektrifizierung der Busflotte abzuleiten.

Denn durch die Umlaufanalyse und die Energiebilanzierung werden die Basiswerte für alle weiteren Schritte der Untersuchung definiert. Der auf den Umläufen erforderliche Energiebedarf bestimmt die folgenden Parameter:

- Systemkonfiguration (Ladestrategie)
- Auslegung Fahrzeug (Traktionskomponenten, Energiespeichersystem)
- Auslegung und Lokalisierung Ladeinfrastruktur
- Energiebereitstellung, insbesondere im Busdepot
- Ggf. Bedarf an zusätzlichen Fahrzeugen und Abstellkapazitäten
- Investitions- und Betriebskosten

Dazu erfolgt die Analyse der vom Auftraggeber übermittelten Umlaufdaten. In der Regel zeichnet sich ab, dass sich die Umläufe nach bestimmten Kriterien zuordnen und kategorisieren lassen. So ist in vielen Fällen die Betrachtung ausgewählter, repräsentativer Umläufe möglich, um ein schlüssiges Gesamtbild über die Gesamtheit aller Umläufe zu ermitteln. Schliesslich erfolgt auch nicht für jeden Umlauf die Definition eines optimalen Systems, sondern es muss ein Konsens über – im Idealfall – eine einheitliche Systemkonfiguration gefunden werden, die sämtliche im Regelbetrieb (sowie in einem gewissen Umfang auch bei Havarie-/Sonderfällen) vorkommenden Situationen abbilden kann.

Die Zusammenführung und dynamische Ergebnisauswertung muss eine iterative Annäherung an die für alle untersuchten Umläufe machbare Systemkonfiguration gestatten. Sofern erforderlich und angebracht, werden auch Technologievarianten empfohlen (z.B. verschiedene Speichergrossen und Ladeleistungen) oder Hinweise zu Optimierungen der Umlaufplanung gegeben, die sich positiv auf die Machbarkeit auswirken.

Für konkrete Beispiele wird an dieser Stelle auf den separaten Leitfadern verwiesen.

4.4 Infrastrukturkonzept

Die Ergebnisse der Netzanalyse hat wesentlichen Einfluss auf die Konzeption der Ladeinfrastruktur. Gelegenheitslader benötigen Ladeinfrastruktur auf dem Streckennetz und im Busdepot, für Voll-lader hingegen muss die Ladeinfrastruktur ausschliesslich im Busdepot bereitgestellt und entsprechend dimensioniert werden. Die Konzeption umfasst zunächst die Ermittlung der Anschlussleistung zur Anbin-

dung an das Stromnetz. Ab dem Netzanschluss muss die elektrische Grundversorgung der Ladeinfrastruktur sowie die Ladeinfrastruktur selbst mit Umrichter- und Trafostationen konzipiert werden. Die Fahrzeugabstellung mit Ladepunkten ist ebenfalls Teil der Konzeption.

Konzeption Netzanschluss Busdepot

Das Nachladen der Busse erfolgt nach dem Einrücken in das Busdepot. Am Beispiel von RBS und BSU wird allen Ladeszenarien unterstellt, dass die Elektrobusse nach ihrem Einsatz auf der Linie in das Busdepot einfahren, gereinigt und gewaschen und anschliessend in der Abstellung aufgestellt werden. Zwischen der Einfahrt in das Busdepot sowie der Abstellung und der damit potenziell frühesten Möglichkeit einer Nachladung vergehen durchschnittlich 30 Minuten.

Unmittelbar vor der Ausfahrt aus dem Busdepot sollte die Vorkonditionierung des Fahrzeuginnenraumes und von Zeit zu Zeit auch das Batteriebalancing mit angesteckter externer Stromversorgung erfolgen. Zwischen dem Ende des eigentlichen Ladevorgangs und der Ausfahrt aus dem Busdepot vergeht somit wiederum eine gewisse Zeit, die nicht für die eigentliche Ladung genutzt werden kann. Für Vorkonditionierung und Balancing werden ebenfalls 30 Minuten angesetzt.

In der Summe wird somit eine Stunde Puffer von der Aufenthaltszeit im Busdepot (Aufenthaltszeit = Ausfahrzeit – Einrückzeit) abgezogen. Die übrige Zeit, die der Elektrobus im Busdepot verbringt, kann zur Ladung genutzt werden.

Die Aufenthalts- und somit auch die Ladezeiten ergeben sich direkt aus den Umlaufdaten. Nach dem Einrücken wird ein Bus mit einer definierten Leistung vollgeladen und anschliessend wieder dem gleichen Wagenlauf zugeordnet. Bei Vollladern wird der Energiebedarf eines Umlaufs als Produkt der angenommenen Verbrauchsdaten und der angegebenen Wegstrecke berechnet. Für die Ermittlung des Energiebedarfes wird keine maximale Batteriekapazität angenommen, sondern der Bedarf nur aus der Wegstrecke abgeleitet. Energiebedarfe, die die Batteriekapazität übersteigen, müssten im realen Betrieb durch mehrere Busse (oder solche mit Range Extender) abgedeckt werden, beeinflussen die Energiebedarfsschätzung für das Busdepot aber nur unwesentlich. Bei Gelegenheitsladern ist nicht der Energiebedarf der gefahrenen Tagesleistung massgebend, sondern die seit der letzten Zwischenladung zurückgelegte Strecke.

Die Simulation der Ladevorgänge erfolgt anhand der nachfolgend genannten Szenarien:

- Gestaffelte Ladung mit fester Leistung: Die Ladung je Bus beginnt unmittelbar nach Einrücken in das Busdepot zzgl. der Rangierzeit mit einer festgelegten Leistung und endet mit Erreichen der vollen Batteriekapazität. Die Leistung kann frei gewählt werden. Für die Simulation des Energiebedarfs werden die Berechnungen für 50 kW, 100 kW und 150 kW Ladeleistung je Bus durchgeführt.
- Gleichmässige Ladung über die Standzeit: Die Ladung je Bus verläuft über die gesamte verfügbare Ladezeit mit einer gleichmässigen Leistung, die im Durchschnitt über die Zeit benötigt wird.

An den gerechneten Beispielen der beiden Busbetriebe RBS und BSU zeigt sich, dass die Ladung der Busse gleichmässig über die Standzeit verteilt werden muss, um sowohl alle Fahrzeuge in der verfügbaren Standzeit laden zu können als auch die Spitzenlast zu minimieren. Unter Berücksichtigung der Verluste von rund 10% der Energiebereitstellungskette (vom Mittelspannungsanschluss bis zum Ausgang des Ladegerätes am Ladestecker), beträgt sowohl beim BSU als auch beim RBS die erforderliche Anschlussleistung bei vollständiger Elektrifizierung 1.5 MW.

Konzeption Mittelspannungsanlage Busdepot

Die Mittelspannungsanlage (Schaltanlage, Transformatoren, Steuerungstechnik) ist brandtechnisch in getrennten Bereichen vom restlichen Busdepot zu planen. Zunächst kann im Bereich der Mittelspannung zwischen einer notwendigen Übergabestation und einer oder mehreren Transformatorstationen unterschieden werden.

Eine **Übergabestation** dient zunächst als Anschlussstelle an das Versorgungsnetz. Der Anschluss erfolgt über das Mittelspannungsnetz, sodass eine Mittelspannungsanlage den Hauptbestandteil der Übergabestation bildet. Die Schaltanlage sollte als zugelassene, standardisierte, fabrikfertige Anlage ausgeführt werden. Durch den Entwurf der Schaltanlage sind Parameter wie Redundanz und Wirtschaftlichkeit auszugestalten. Die Anlage sollte in der Lage sein, für eine zuverlässige Ladung der Batteriebusse zu sorgen. Je nach gewünschter Konfiguration hat die Übergabestation einen Flächenbedarf von

ca. 14 m² bis 86 m². Die Übergabestation sollte möglichst in der Nähe der Strasse platziert werden, um den Anschluss an das Mittelspannungsnetz und einen möglichen Zugang vom Netzbetreiber zu vereinfachen.

Falls die Übergabestation und die Transformatorstationen räumlich getrennt sein sollten, so ist die Leistung im Busdepot über ein Mittelspannungsnetz zu verteilen. Die höchste Spannungsebene sollte so nah wie möglich an den Ladepunkt gebracht werden. So lässt sich die Verlustleistung in Grenzen halten. Dieses Netz kann über einen oder mehrere Stiche oder über einen oder mehrere Ringe aufgebaut werden. Dabei bietet eine Ringstruktur hinsichtlich der Redundanz gegenüber Stichen deutliche Vorteile. Je nach den Standorten der Übergabestation und den Transformatorstationen sind Strecken von bis zu 200 m zu überwinden.

Ein **Mittelspannungsring** belegt zwei Felder in der Schaltanlage der Übergabestation, sodass der Ring von zwei Seiten gespeist werden kann. Die notwendigen Transformatoren zur Versorgung der nachgeschalteten Ladegeräte werden über Unterstationen angeschlossen. Diese enthält eine Schaltanlage zum Einschleifen des Rings sowie einen Abgang für den Transformator. Der Transformator und die entsprechende Schaltanlage bilden eine Transformatorstation. In einen Ring können mehrere Transformatorstationen eingebunden werden. Der Ring kann als «offener Ring» oder «geschlossener Ring» betrieben werden.

Bei der Betriebsweise «offener Ring» ist der Ring an einer Stelle an einer Transformatorstation geöffnet, so dass die Transformatorstationen von jeweils einem Abgangsfeld der Übergabestation gespeist werden. Der Schutz erfolgt über die Schaltfelder in der Übergabestation und kann so als relativ einfach bezeichnet werden. Tritt ein Fehler auf, so löst das entsprechende Schutzgerät in der Übergabestation aus und schaltet den fehlerhaften Abschnitt, aber auch den fehlerfreien Abschnitt, bis zu der Stelle aus, an der der Ring geöffnet ist. Durch Kurzschlussanzeiger kann der fehlerhafte Abschnitt geortet und daraufhin herausgeschaltet werden. Der Ring wird dann an der vorher geöffneten Stelle geschlossen, sodass alle fehlerfreien Transformatoren weiter betrieben werden können. Durch die Schaltvorgänge verringert sich die Verfügbarkeit der Anlage.

Um die Verfügbarkeit zu verbessern kann der Ring als «geschlossener Ring» betrieben werden, wodurch sich allerdings auch die Kosten erhöhen. Dafür sind an jeder Transformatorstation Schutzgeräte zu installieren, die auf die anderen Schutzgeräte ausgerichtet sind. Dadurch wird eine Selektivität erreicht, die einen Weiterbetrieb der fehlerfreien Transformatorstationen ermöglicht. Für diese Option sind Leistungsschalter in den Schaltanlagen zu verwenden, diese können aus der Ferne ein- und ausgeschaltet werden.

Die **Transformatorstation** besteht aus einem festen Gebäude, das einen Mittelspannungstransformator, eine Mittelspannungsschaltanlage, sowie eine Niederspannungsverteilung beinhaltet. Der Transformator wandelt die Mittelspannung ($U_N = 16 \text{ kV}$) auf Niederspannung ($U_N = 400 \text{ V}$, bzw. eine auf die Ladegeräte angepasste Spannung). Die Mittelspannungsschaltanlage dient zur Einschleifung des Transformators in den Mittelspannungsring. Die Niederspannungsverteilung verteilt die Leistung zu den Ladegeräten.

Eine Transformatorstation, die als Kompaktstation ausgeführt wird, nimmt eine Fläche von ca. 5 m² bis 8 m² zuzüglich der Zuwegung in Anspruch.

Für möglichst hohe Wirkungsgrade, niedrigen Kühlaufwand und lange Lebensdauer auch bei voller Auslastung der Ladetechnik sollten die Transformatoren nicht in Vollast, sondern bei maximal etwa 80 % der Nennleistung betrieben werden.

Eine wichtige Grösse für die Auslegung der Stromversorgung ist die Wahl der Leistungsgrösse der Transformatoren. Grosse Transformatoren haben geringere Kosten und einen geringeren Platzbedarf. Jedoch sind bei Ausfall eines Transformators unter Umständen mehr Ladegeräte betroffen, wobei solche Ausfälle äusserst selten sind. Bei Verwendung der Standardspannung 400 V_{3AC} sollte auf Ortsnetztransformatoren zurückgegriffen werden, welche in definierten Leistungsgrössen von 630 bis 1600, teilweise auch bis 2.500 kVA verfügbar sind.

Konzeption Ladetechnik Busdepot

Es ist davon auszugehen, dass jeder Elektrobuss an seinem Abstellort eine Vorrichtung zum konventionellen Nachladen während der nächtlichen Betriebspause benötigt, unabhängig vom verfolgten Ladekonzept (Voll- oder Gelegenheitslader). Ohne Lademöglichkeit an jedem Stellplatz eines Elektrobusses würde sich der Rangieraufwand erhöhen und alle Ladeplätze müssten unabhängig voneinander befahrbar sein. Übliche Ladeleistungen bei der Depotladung liegen im Bereich 50 bis 150 kW; niedrigere Bedingungen zu lange Standzeiten für den Anwendungsfall, höhere eine zu hohe Belastung der Batterie und der Kontaktstellen.

Neben der Ladeleistung ist die technische Konfiguration der Ladepunkte ein wichtiger Faktor für die Kosten. Es sind verschiedene Möglichkeiten denkbar, die sich in Komplexität, Kosten und Flexibilität unterscheiden. Die verschiedenen Möglichkeiten zum Aufbau der Ladeinfrastruktur können nach verschiedenen Gesichtspunkten unterschieden und variiert werden.

Streckenladepunkte

Aufgrund der Charakteristik der Gelegenheitsladung muss während der kurzen Wendezeit eine möglichst hohe Ladeleistung bereitgestellt werden, um ausreichend grosse Energiemengen zu übertragen. Die Leistung beläuft sich auf ca. 300-450 kW. Bei einem Wirkungsgrad von 90 % ist also eine Anschlussleistung von 390-500 kW erforderlich. Für eine zuverlässige Nachladung ist diese Anschlussleistung am Endpunkt zu gewährleisten. Kann diese Anschlussleistung am betreffenden Ort nicht garantiert werden, so ist ein stationärer Energiespeicher zu installieren, der die zusätzliche Leistung im Bedarfsfall abgeben kann.

Für einen beispielhaften Schnellladepunkt mit einer Ausgangsleistung von 350 kW und einem Ladepunkt beläuft sich der Flächenbedarf für die Ladeinfrastruktur (Transformator und Ladegerät) auf ca. 14 m².

4.5 Betriebliches Konzept

Das betriebliche Konzept umfasst den Aufbau der IT-Systemarchitektur zur intelligenten Steuerung und Kontrolle aller den Busbetrieb betreffenden Prozesse im Busdepot während der Betriebsruhe sowie ausserhalb des Busdepots während der Einsatzzeiten. Kern der elektrobus-spezifischen Funktionen der IT-Systeme soll ein Lademanagementsystem für die Ladung von Elektrobussen sein.

Anforderungen an Beschaffung und Betrieb

Zusätzlich zu den heute eingesetzten elektronischen Hilfsmitteln wie Leitsystem oder Systeme zur Fahr- und Umlaufplanung sind mit der Einführung von Elektrobussen weitere Systeme zur Optimierung der Betriebsabläufe notwendig, welche in die geplante Systemlandschaft integriert werden müssen.

Bei der Integration von Elektrobus-spezifischen Systemen sollte möglichst auf standardisierte bzw. standardisierbare Software, Komponenten und Schnittstellen gesetzt und keine Insellösung geschaffen werden. Somit können die Kosten für Entwicklung und Wartung gering gehalten werden, der Betrieb kann besser von zukünftigen Entwicklungen profitieren und es kann eine möglichst grosse Kompatibilität mit anderen heute und künftig am Markt verfügbaren Systemen gewahrt werden.

Es wird empfohlen, die IT-Systemlandschaft nicht als Gesamtsystem, sondern einzeln zu definieren und zu beschaffen bzw. zu konfigurieren. Hierfür sprechen mehrere Gründe:

- Die festzulegenden Anforderungen können in der Summe nicht von einem einzelnen Standard-System erfüllt werden bzw. es ist kein derart umfassendes System am Markt verfügbar. Im Gegenzug stehen für die Einzelsysteme erfahrene und spezialisierte Anbieter zur Verfügung. So kann jedes System seinen Teilbereich optimieren und diese Optimierung weitergeben.
- Durch die Modularität kann jedes System unabhängig auf Veränderungen reagieren bzw. dementsprechend angepasst werden. Die verarbeiteten Informationen behalten die gleiche Struktur und liefern den entsprechenden Output.
- Abhängig von der gewünschten bzw. erforderlichen Komplexität sind einzelne Systeme hinzuzufügen oder herauszulösen.

- Die Trennung der Systeme und das Vorsehen eines isolierten oder manuellen Betriebs erhöhen die Betriebssicherheit. Fällt ein Teilsystem durch einen Fehler aus, ist weiterhin ein eingeschränkter Betrieb möglich.
- Die Aufteilung ermöglicht verschiedene Zeiträume für die Beschaffung und den Ersatz der Teilsysteme. Die Einführung der Systeme kann schrittweise erfolgen, die Komplexität reduziert und aus den Erfahrungen für die weitere Implementierung des Lademanagements gelernt werden.

Gleichwohl bedeutet dies einen erhöhten Aufwand bei der Systemkonfiguration:

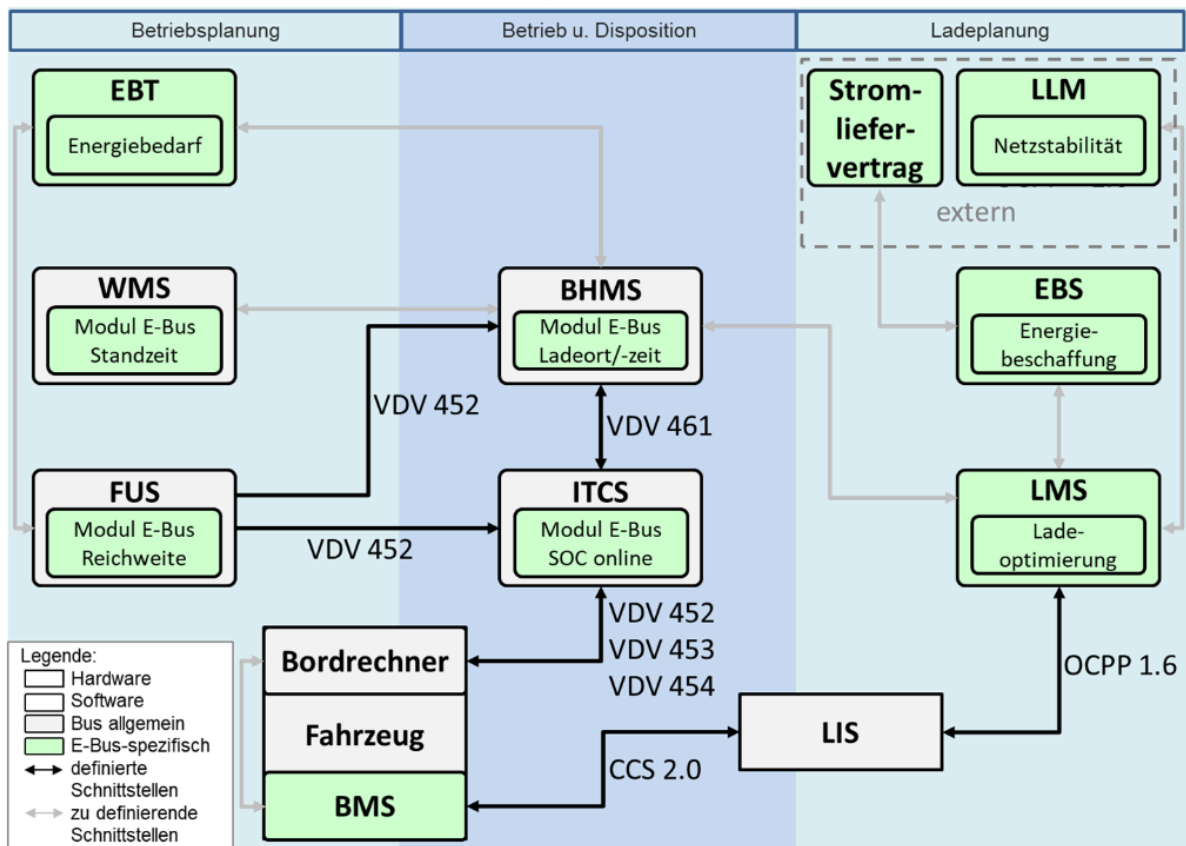
- Es besteht ein hoher Aufwand für die Einrichtung von Schnittstellen zum Datenaustausch. Dieser wird jedoch zwingend von den Systemen gefordert, um die reibungslose Kommunikation zwischen ihnen sicherzustellen. Der kundenspezifische Anpassungsaufwand für den Systemlieferanten beschränkt sich auf die Abstimmung der Systeme untereinander und die Integration der speziellen örtlichen Gegebenheiten (z. B. eingesetzte Ladetechnik und Busse).
- Es besteht ein hoher Aufwand für die Möglichkeit der Rückkopplung der Optimierung. Die Rückkopplung würde der iterativen Berechnung von Input- und Outputdaten zur Übergabe an den Systemschnittstellen dienen.

Die hier beschriebene Aufteilung der verschiedenen Funktionsbausteine und somit die genaue Ausgestaltung der Software-Lösungen ist nicht als starre Festlegung zu betrachten. Die Priorität liegt darin, mit Blick auf den gesamten Busbetrieb eine abgestimmte Software-Lösung zu schaffen.

Grundsätzlich müssen alle Einzelsysteme unabhängig voneinander betrieben und gegebenenfalls manuell mit Daten versorgt werden können. Dies gilt in der Einführungsphase insbesondere für das Lademanagement, wenn bei dessen Installation die anderen IT-Systeme noch nicht für den Elektrobusbetrieb konfiguriert sind. Gleichfalls gilt dies im Falle von Fehlern oder Ausfällen einzelner oder mehrerer Systeme, die einen zuverlässigen automatisierten Betrieb anderer Systeme verhindern.

Zudem muss jedes System für die Übergangszeit zum vollständig elektrisch betriebenen Busverkehr bei RBS und BSU einen Parallelbetrieb von Diesel- und Elektrobussen ermöglichen.

Die folgende Abbildung zeigt eine denkbare Ausgestaltung der gesamten IT-Systemlandschaft, die neben der Ladung der Elektrobusse auch alle anderen Prozesse im Busdepot und im Einsatz der Fahrzeuge plant, steuert und kontrolliert.



Die Systemlandschaft umfasst folgende Module:

- EBT: Energieberechnungstool
- WMS: Werkstattmanagementsystem
- FUS: Fahr- und Umlaufplanungssystem
- BHMS: Betriebshofmanagementsystem
- ITCS: Betriebsleitsystem
- BMS: Batteriemanagementsystem
- LIS: Ladeinfrastruktur
- LMS: Lademanagementsystem
- EBS: Energiebeschaffungssystem
- LLM: Lokales Lastmanagement

Bezogen auf den Betrieb mit Elektrobussen werden das Lademanagementsystem, das Energiebeschaffungssystem und das Betriebshofmanagementsystem als Kernsysteme betrachtet. Diese Module inklusive den Schnittstellen werden im Leitfaden [1] detailliert erläutert.

4.6 Submission

Wichtig für die Einführung von Elektrobussen ist die Einhaltung aller systemrelevanten Normen (Gesetze, Richtlinien, Verordnungen), allen voran jene, die den Betrieb und die Betriebssicherheit von Elektrobussen beeinflussen. Ergänzend werden die wichtigsten technischen und betrieblichen Regelwerke und Schriften des Verbandes Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) zum Thema Elektrobusse aufgenommen, sowie Schriften der Berufsgenossenschaften. Zu berücksichtigen sind dabei:

- VDV-Mitteilung Nr. 2319: Bewertung von E-Bus-Konzepten aus der Sicht von Planung und Betrieb
- VDV Schrift 260: EBUS-Infrastrukturen/Ladestellen

- VDV-Schrift 230/1: Rahmenempfehlung für elektrisch betriebene Stadt-Niederflur-Linienbusse (E-Bus)
- VDV-Schrift 825 (12/05): Auswirkungen alternativer Technologien im Linienbus auf Betriebshöfe und Werkstätten
- VDV-Mitteilung Nr. 8002: Hinweise zur Einführung von Hybridbussen aus Sicht der Instandhaltung
- BGI/GUV-I 8686: Qualifizierung für Arbeiten an Fahrzeugen mit Hochvoltsystemen.

Als Grundlage für künftige Ausschreibungen von Elektrobussen wurde ein Musterlastenheft [1] erarbeitet, welches sich in folgende Teilbereiche gliedert.

- Grundlagen
- Technische Daten (Abmessungen, Massen)
- Fahrwerk
 - Lenkung
 - Räder, Achsen
- Bremsen
- Fahrzeugaufbau
- Türen
- Innenausstattung
- Fahrerarbeitsplatz
- Versorgungsanlage
- Antrieb und Energiemanagement
 - Klimatisierung, Heizung
- Hochvolttechnik
 - Energiespeicher
 - Ladeschnittstelle
- Informationseinrichtungen
- Datenschnittstellen
- Garantiebedingungen
- Abschätzung Reparaturaufwand

4.7 Finanzierung

Die Kostenbetrachtung wird auf Basis der Kapitalwertmethode durchgeführt. Es fließen sämtliche Investitionskosten (Fahrzeug, Traktionskomponenten, Energiespeichersystem, Ladeinfrastruktur inkl. Errichtungskosten, Anschlussherstellung an das örtliche Energienetz) und die erforderliche Erneuerung der Traktionsenergiespeicher in bestimmten Intervallen unter Berücksichtigung der Kosten der Kapitalverzinsung ein. Weiterhin sind sämtliche Betriebskosten in der Betrachtung enthalten (Kraftstoff- bzw. Energiekosten, AdBlue, ggf. Heizöl, Wartung und Instandhaltung, Fahrzeugreserve zeitlich gestaffelt). Die Ausweisung der Betriebskosten erfolgt dabei lauffleistungsbezogen. Für die Kostensätze und deren Herleitung wird auf den Leitfaden [1] verwiesen.

5 Diskussion

Die Ausführungen und Empfehlungen im vorliegenden Schlussbericht und im Leitfaden [1] basieren auf dem aktuellen Stand der Technik. Da sich der technologische Wandel in Bezug auf die Elektromobilität in den kommenden Jahren voraussichtlich weiterhin rasant entwickeln wird, sind diese technischen Detaillausagen zu einem späteren Zeitpunkt nochmals kritisch zu hinterfragen. Die Systematik der Vorgehensweise einer Umstellung auf E-Busse dürfte aber stabil sein.

In dieser Untersuchung liegt der Fokus auf Batteriebussen, andere alternative Energien werden ausgeklammert. Für ÖV-Betriebe welche neben Dieselbusflotten auch noch Tram- oder Trolleybusnetze betreiben, gelten die Empfehlungen nur bedingt, da in dieser Untersuchung beispielsweise zusätzliche technische Möglichkeiten wie «in motion charging-Systeme» (Aufladen am Fahrdraht während der Fahrt) ausgeklammert werden.

In der Kostenkalkulation werden Beiträge von Dritten ausgeklammert, da diese schweizweit noch nicht institutionalisiert sind. Anhand von Förderbeiträgen könnten die höheren Anfangsinvestitionen von E-Bussystemen jedoch gesenkt werden. Noch sind die Kosten für die Elektromobilität deutlich höher als diejenigen von Dieselnbussen. Das liegt auch daran, dass Elektrobussen noch nicht lange am Markt sind. In den kommenden Jahren ist die Wahrscheinlichkeit eines Preiszerfalls von E-Bussystemen jedoch hoch. Zusätzlich sind auf politischer Ebene Tendenzen absehbar, dass Förderanreize zugunsten der Elektromobilität geschaffen werden können, womit dieser Technologie zusätzlicher Schub verlieht werden könnte. Gleichzeitig dürften sich die Dieselpreise durch Senkung der bisherigen Subventionen und durch den aufwändigeren Abbau der Grundressource Erdöl auf lange Sicht eher verteuern.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Elektrifizierung einer Dieselnbusflotte stellt hohe Anforderungen an die jeweiligen Transportunternehmen – sowohl in fachlicher Hinsicht im Vorfeld für Konzeption und Beschaffung als auch betrieblich nach der Umstellung auf Elektrobussen. Im Unterschied zu konventionellen Busbetrieben wird der Betrieb und Unterhalt von Ladeinfrastrukturen sowie der Umgang mit der Hochvolttechnik und der Umgang mit diesen Gefahren ein neues wichtiges Themenfeld werden. Mit dem Leitfaden [1] erhalten die Transportunternehmen eine gute Basis, um sich mit der neuen Technologie vertieft auseinanderzusetzen und im Betrieb die fachlichen Grundlagen aufzubauen.

Damit die Kompatibilität aller Systeme eines Busbetriebs gewährleistet werden kann, muss das Thema Elektromobilität nicht nur bezogen auf ein einzelnes Fahrzeug oder eine einzelne Linie betrachtet werden, sondern es ist in der Regel eine gesamtheitliche Betrachtung unter Einbezug von Fahrzeugen, Ladeinfrastruktur und IT-Systemen (inklusive Schnittstellen) für das komplette Liniennetz notwendig. Unter Umständen müssen auch benachbarte Transportunternehmen einbezogen werden, damit gewisse (Strecken-)Ladepunkte gemeinsam genutzt werden können. Diese Untersuchungen bedingen einen grossen Aufwand, weshalb diese Arbeiten rechtzeitig angegangen werden müssen.

Ebenfalls frühzeitig eingeplant werden muss die Schulung des Personals für Fahrbetrieb und Reparaturdienst. Insbesondere für das Werkstattpersonal hat die Einführung von Elektrobussen grosse Konsequenzen. Der Einzug der Hochvolttechnologie in die Werkstätten führt zu wesentlichen Veränderungen des Berufsbilds. Künftig werden Werkstattmitarbeitende vermehrt elektrische Arbeiten ausführen müssen, dafür sinkt der Aufwand für mechanische Revisionsarbeiten. Diesem Aspekt ist frühzeitig eine hohe Aufmerksamkeit zu schenken.

Wichtig ist die Festlegung und Einhaltung von Standards, zudem vereinfacht die Beschränkung auf möglichst wenig Teilsysteme später den Betrieb und Unterhalt. Bei der Beschaffung von Fahrzeugen und Ladesystemen ist zudem darauf zu achten, mit dem Lieferanten einen Werklieferungsvertrag abzuschliessen, der ebenfalls den Unterhalt der Fahrzeuge und Ladeinfrastruktur über die gesamte Einsatzdauer regelt.

Noch offen ist die Frage, wie die Umstellung auf Elektrobussenbetrieb finanziell gelingen soll. Die anhand der aktuellen Marktpreise durchgeführten Berechnungen zeigen auf, dass im Vergleich zu reinen Dieselnbusflotten zusätzliche finanzielle Mittel benötigt werden, um Elektrobussen zu beschaffen und zu betreiben. Im Unterschied zu Deutschland beispielsweise gibt es in der Schweiz auf nationaler Ebene noch keine Fördermassnahmen für Elektrobussen, welche zu einer substantiellen Preisreduktion führen und der Elektromobilität zum Durchbruch verhelfen würden. Einen wesentlichen Einflussfaktor hat die Rückerstattung der Mineralölsteuer, welche mit CHF 0.58 zu Buche schlägt. Falls dereinst diese indirekte Fördermassnahme für Dieselnfahrzeuge aufgehoben werden sollte und zusätzlich Lenkungsabgaben auf nichterneuerbare Energieträger eingeführt werden, würde der Einsatz von Elektrobussen auch finanziell attraktiver. Bis dahin sind aber die Besteller von ÖV-Leistungen gefordert, um ausgewogene Förderanreize zu setzen.

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

AC	Wechselstrom («alternating current»)
BAV	Bundesamt für Verkehr
BGI	Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit
BHMS	Betriebshofmanagementsystem
BMS	Batteriemanagementsystem
BSU	Busbetrieb Solothurn und Umgebung AG
CHF	Schweizer Franken
DC	Gleichstrom («direct current»)
EBS	Energiebeschaffungssystem
EBT	Energieberechnungstool
FUS	Fahr- und Umlaufplanungssystem
GUV	Gemeindeunfallversicherungsverbände
IEC	International Electrotechnical Commission
ITCS	Betriebsleitsystem
kV	Kilovolt
kVA	Kilovoltampère
kW	Kilowatt
LIS	Ladeinfrastruktur
LLM	Lokales Lastmanagement
LMS	Lademanagementsystem
LTO	Lithium-Titanat-Akkumulator
MW	Megawatt
ÖV	Öffentlicher Verkehr
RBS	Regionalverkehr Bern-Solothurn AG
SORT	Standardized on-road test cycles (Standardisierter Testzyklus für die Verbrauchsmessung)
V	Volt
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V.
WMS	Werkstattmanagementsystem

Literaturverzeichnis

- [1] M. Otte, J. Schwarzenberger, M. Quassowski, C. Schulz, R. Zürcher: **Leitfaden Flottenelektrifizierung für Busbetriebe**, 2019.