



Foto: Osterer

Abb. 1: Der Salzburger eObus stammt vom Schweizer Hersteller Carrosserie Hess AG.

eObus: Dekarbonisierung nach einem Jahr Praxis

Von der Weiterentwicklung des Obus in Salzburg – zukunftssträchtige Technik, die überzeugt

Peter Brandl, Innsbruck; Christian Osterer, Salzburg

Der ÖPNV ist das effizienteste und umweltfreundlichste Verkehrssystem für Ballungszentren und der wesentliche Beitrag zur Bewältigung der Mobilitäts- und Umweltprobleme. Beim Ausstieg aus den fossilen Kraftstoffen ist der ÖPNV durch den hohen Elektrifizierungsgrad bei den voll-elektrischen Verkehrsmitteln wie Eisenbahn, Straßenbahn, Trolleybus (Obus) und U-Bahn seit langer Zeit Vorreiter.

Mit dem rasch zunehmenden Problem der Klimaerwärmung werden seit einigen Jahren die Bestrebungen für eine Dekarbonisierung der Mobilität verstärkt. Schreitet bei der Bahn – mit wenigen Ausnahmen – die Errichtung von Oberleitungen voran (bereits heute sind circa 60 Prozent der Eisenbahnstrecken in Deutschland, 70 Prozent in Österreich und 100 Prozent in der Schweiz elektrifiziert), so wird im straßen-gebundenem ÖPNV zunehmend auf Batterie- oder Wasserstofftechnologie gesetzt.

Jene Betriebe, die bereits die letzten Jahrzehnte den Trolleybus forcierten, sind dabei heute klar im Vorteil bei der Umsetzung der Clean Vehicle Directive (CVD), welche im Sommer 2019 von der Europäischen Union erlassen wurde. Sie können „alte“ und „neue“ Technologie vereinen und diese effizient und effektiv nutzen.

Durch den sinnvoll ergänzenden Einsatz der sich laufend weiterentwickelnden Batterietechnologie wird mit dem Trolleybus ein völlig emissionsloses öffentliches Verkehrsnetz in Ballungszentren ermöglicht, ohne dass sich wesentliche zeitliche und wirtschaftliche Risiken bei der Projektierung und in der Umsetzung ergeben. Dies liegt vor allem in der sanften Integration von Innovationen begründet, welche in eine nahezu 140-jährige Technologie einfließen. Und die Nutzung vorhandener Fahrleitungsanlagen samt der Ergänzung um die laufend optimierte Batterietechnologie ist die wirtschaftlichste und nachhal-

tigste Lösung für den elektrischen ÖPNV in Ballungszentren. Die Nachladung der Batterie während der Fahrt (Streckenladung oder In-Motion-Charging [1]) ermöglicht hier völlig neue Möglichkeiten. So setzen beispielsweise Solingen, Zürich, Luzern, Parma, Modena wie auch Salzburg bereits auf dieses System. Im Weiteren wird nach einem erfolgreichen Betriebsjahr in Salzburg über die Erkenntnisse dieses „Hybridsystems“ berichtet. Dabei ist auch ein Rückschluss möglich, ob nicht auch Städte, welche bisher keinen Trolleybus betreiben, nicht von einer Teilelektrifizierung profitieren können. Erste vielversprechende Studien dazu gibt es beispielsweise für Berlin oder Klagenfurt.

Strategische Handlungsfelder

Als wesentliches strategisches Handlungsfeld bei der Neueinführung oder Erweiterung eines Trolleybus-Systems mit parti-

ell fahrleitungsfreien Abschnitten erweist sich die Wechselwirkung zwischen Betrieb, Fahrzeugen und Infrastruktur. Eine integrierte Betrachtung beider Subsysteme ist in Bezug auf eine wirtschaftlich und betrieblich optimale Umsetzung unerlässlich. Auch bieten innovative, digitale Technologien wie Digital Energy und Weiterentwicklungen im Bereich der Telekommunikation (zum Beispiel der Netzausbau von 5G) weitreichende Chancen in Bezug auf die Ermittlung und Übertragung von Zuständen der Subsysteme in Echtzeit und sind bereits in der Projektierungsphase zu berücksichtigen.

Die planerische Erarbeitung eines derartigen Trolleybus-Systems erfolgt dabei in der Regel in vier wesentlichen Schritten:

- Abbilden der Betriebsdaten (Fahr- und Umlaufplan erfassen, Haltestellenabfolge, Höhenprofil, Verspätungsstatistik et cetera),
- Abbilden der technischen Daten der neuen und/oder bestehenden Infrastruktur

(elektrifizierte Strecke, Gleichrichterwerke, Fahrleitungsspannung, geplante Systemwechselstellen und so weiter),

- Abbilden am Markt verfügbarer, weitgehend standardisierter Fahrzeugvarianten (Flottenmanagement, Fahrgastkapazität, Batterietypen et cetera),
- Simulation des Betriebs und Selektion der idealen Subsysteme.

Das Ergebnis dieser integrierten Betrachtung von Betrieb, Fahrzeugen und Infrastruktur ist eine in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Betrieb und Technik optimierte Auslegung des Gesamtsystems. Durch die Nutzungsdauer von Fahrzeugen bis zu 25 Jahren, der Gleichrichterwerke von bis zu 30 Jahren und der Fahrleitung selbst von bis zu 40 Jahren stellen in der Regel nicht die Anschaffungskosten den Kostentreiber dar, sondern die laufenden Betriebskosten. Eine LCC-Betrachtung ist daher unumgänglich.

Die größte Unbekannte in dieser Berechnung sind die Entwicklungen der Batterie-

riekosten und der Batterieleistung. Die Entwicklung der letzten Jahre war hier erfolgsversprechend. Allerdings ist es noch nicht absehbar, ob große Fahrzeuge mit hoher Linienleistung auch tatsächlich – bei jeder Witterung und ohne fossiler Zusatzheizung – mit einer Batterieladung eine Tagesleistung bewältigen können [2]. Und das auch auf lange Sicht: Immerhin nimmt mit der Alterserscheinung der Batterie die Ladezeit signifikant zu [3]. Ganz abgesehen davon ist die Batteriegröße beziehungsweise das Batteriegewicht ab einem gewissen Umfang wirtschaftlich nicht mehr zu vertreten. Von den negativen ökologischen Aspekten ganz abgesehen: Welchen ökologischen Fußabdruck hinterlässt die Produktion der Batterien? Welche „kritischen Rohstoffe“ werden in der Batterie verarbeitet? Welche Umweltauswirkungen sind bei Herstellung und Entsorgung zu erwarten? Allerdings ist eines auch klar: Aufgrund der hohen Laufleistung lohnt sich die E-Mobilität beim Bus ganz besonders, da die zusätzlichen Emissionen der Herstellung von Fahrzeug und Batterie über sehr viele Ki-

ANZEIGE

HESS E-Bus Systeme

HESS E-Bus-Systeme sind dank ihrem lokal emissionsfreien Elektroantrieb das ideale Verkehrsmittel für den hochbelasteten Stadtverkehr. Sie sind leistungsstark, leise und energiesparend.

Nutzen Sie den Erfolg aus über 80 Jahren Elektrobus-Herstellung



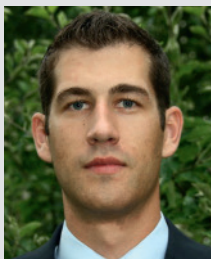
CLEAN CITIES – SMART BUS SYSTEMS

HESS
www.hess-ag.ch



Zum Autor

Peter Brandl (47) ist Assistent an der Universität Innsbruck, Arbeitsbereich für Intelligente Verkehrssysteme, und auch als selbstständiger Berater mit Bracon im Bereich des ÖPNV tätig. Die letzten Jahre war er als Betriebsleiter, Bereichsleiter und Geschäftsführer für den ÖPNV in Salzburg zuständig und dabei auch für das Projekt eObus verantwortlich. Als Vorsitzender der Arbeitsgruppe Städtische Verkehrsunternehmen koordinierte er die Verkehrsunternehmen im österreichischen Fachverband.



Zum Autor

Christian Osterer (35) ist seit rund zehn Jahren bei der Salzburg AG als Centerleiter für technische Assets zuständig für Fahrzeugbeschaffungen und die strategische Ausrichtung des elektrischen ÖPNVs. Er leitete ebenfalls das Projekt eObus. Seit einigen Jahren ist er Mitglied der Betriebsleitung gemäß Eisenbahngesetz und Verkehrsleiter gemäß Kraftfahrlineigesetz. Sein Studium Maschinenbau-Verkehrswesen absolvierte er an der Technischen Universität Graz.

lometer verteilt werden. Beim privaten Pkw ist das jedenfalls kritischer zu sehen.

Chancen der Digitalisierung

Die bereits eingangs erwähnten neuen Technologien bieten weitreichende Chancen in Bezug auf die Vernetzung von Fahr-

zeug und Infrastruktur. Stand der Technik ist bereits heute ein selbstlernendes Energiemanagementsystem, das die Parameter in Abhängigkeit des gewählten Fahrmodus (Fahrleitungsbetrieb oder Betrieb mit Traktionsbatterie) anpasst. Namhafte Fahrzeughersteller sehen die Hauptaufgabe des Energiemanagementsystems einerseits in der Glättung von Spannungsspitzen im

Fahrleitungsnetz zum sinnvollen Downsizing und damit zur Kostensenkung in Bezug auf die Infrastruktur und andererseits in der Umsetzung einer idealen Ladestrategie zur Schonung der Traktionsbatterie. Die im Maschinenbau bekannte Wöhler-Kurve gilt in weitgehend gleicher Form auch für Batterien: Je höher die Belastung eines Bauteils beziehungsweise der Batterie, desto höher ist die Schädigung beziehungsweise desto weniger Zyklen sind möglich. Umgekehrt bedeutet das, je geringer die Belastung eines Bauteils beziehungsweise der Batterie ist, desto mehr Zyklen können erzielt werden. In Bezug auf Traktionsbatterien in Fahrzeugen gilt daher, dass viele kleine Zyklen von wenigen Prozent SOC (State of Charge) die Batterie nicht schädigen und daher als Spielraum zur Glättung der Spannungsspitzen im Fahrleitungsbetrieb herangezogen werden können. Das heißt, dass auch im Fahrleitungsbetrieb idealerweise die Traktionsbatterie Energie abgibt und aufnimmt, nämlich genau dann, wenn das Fahrzeug beschleunigt oder bremst. Durch die gesammelten Betriebsdaten können auch die Optimierung unter anderem in Bezug auf eine optimierte Steuerung von Heizung, Lüftung beziehungsweise Klimatisierung herangezogen werden.

Vorzeigeprojekt eObus Salzburg

Die Notwendigkeit zur Erneuerung der Obusflotte in Salzburg und der langjährige Wunsch der Gemeinde ÖV nach einer schnellen, umsteigefreien ÖV-Verbindung über den Stadtteil Gneis ins Zentrum der Landeshauptstadt Salzburg bot eine einmalige Chance zur Umsetzung eines Vorzeigeprojekts, welches bereits im Vorfeld der Umsetzung den VCÖ-Mobilitätspreis 2018 erhielt.

Neu und innovativ ist der Betrieb der Obuslinie 5 mit Trolleybussen mit Traktionsbatterie (in Salzburg als eObus bezeichnet) über das bisherige Linienende an der Weidenstraße hinaus bis zum Busterminal in St. Leonhard. Die Ladung der Traktionsbatterien erfolgt komplett während der Fahrt im bestehenden Fahrleitungsnetz, welches zur Bereitstellung von ausreichend Energie um ein Gleichrichterwerk nahe des Kommunalfriedhofs ergänzt wurde. Eine in der Planungsphase erwogene Errichtung einer zusätzlichen Ladestelle an der Endstation – ausgeführt als kurze Streckenelektrifizierung – wurde verworfen: Die Wendezeit ist mit Unsicherheit behaftet (Verspätung), die Ladeleistung durch den Stromabneh-

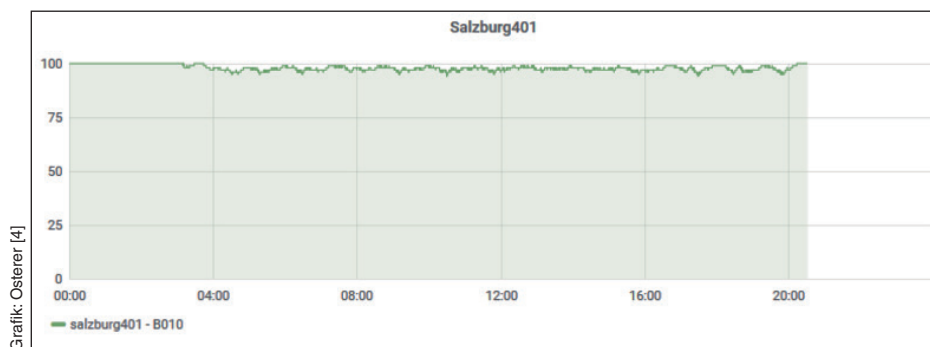


Abb. 2: Gut erkennbar bei der SOC-Kurve ist die Verwendung der Traktionsbatterie zur Glättung von Spannungsspitzen im Fahrleitungsnetz (geringes Laden und Entladen über den gesamten Betriebstag).

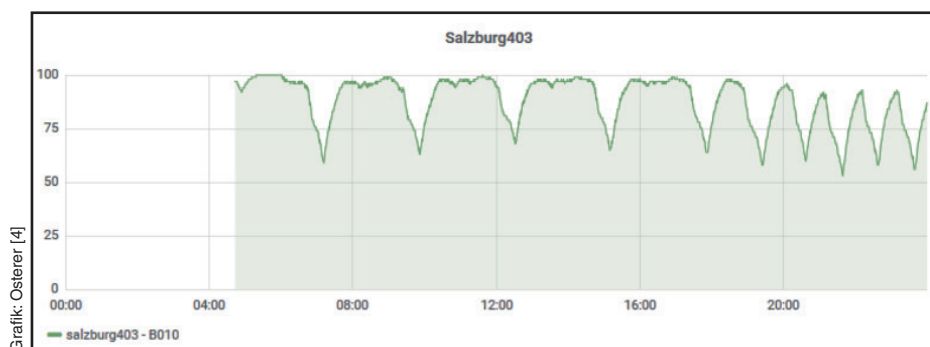
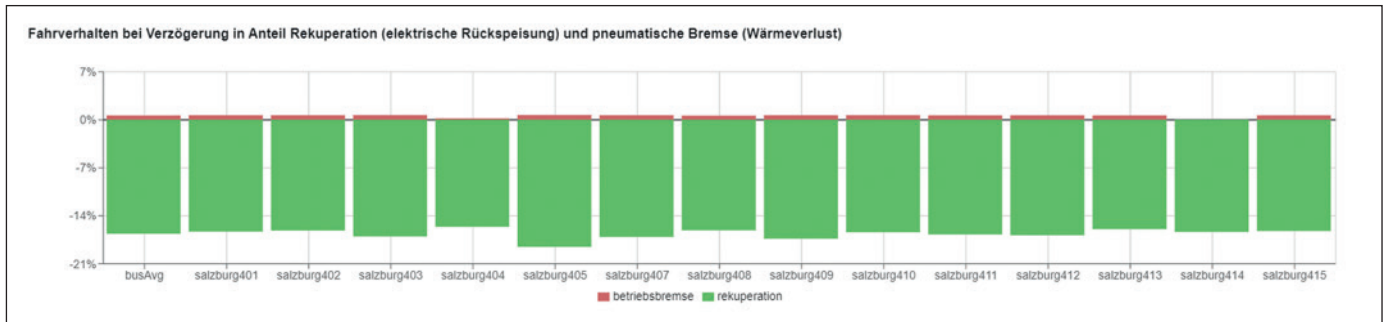


Abb. 3: SOC-Kurve über einen Betriebstag auf der eObus-Linie 5 in Salzburg. Die tiefen Entladungen stellen die Fahrten im fahrleitungslosen Abschnitt (bei warmer Außentemperatur) dar. Ab 19 Uhr ist der Linienweg unter Fahrleitung – und damit die Ladezeit – verkürzt.



Grafik: Osterer [4]

Abb. 4: Die Graphik über den Zeitraum Januar bis Dezember 2020 für alle eBusse zeigt klar: Der überwiegende Teil der Bremsenergie kann rekuperiert werden.

mer begrenzt und die Kosten für ein zusätzliches Gleichrichterwerk unverhältnismäßig hoch.

Die Linienführung der neuen eObus-Linie 5 folgt – ab der Stadtgrenze ohne Fahrleitung – der Berchtesgadener Straße nach Grödig und weiter bis zur Endstation, nach rund 4,2 Kilometern ohne Fahrdraht, an der Untersbergseilbahn in St.Leonhard. Der Streckenverlauf weist zwar nur geringe Steigungs- beziehungsweise Gefällestrecken auf, wird aber teilweise mit bis zu 80 km/h befahren.

Seit dem Fahrplanwechsel im Dezember 2019 werden die Fahrten nach Grödig in den Fahrplan der Linie 5 integriert, damit verkehrt im Vollbetrieb an Werktagen jede zweite Fahrt „fahrleitungslos“ weiter nach Grödig (im 20'- beziehungsweise 30'-Takt) und am Abend beziehungsweise an Sonn- und Feiertagen jede Fahrt nach Grödig (im 20'-Takt). Am Abend wird die Linie im Stadtzentrum außerdem kurzgeführt, was insofern wesentlich ist, da sich die Ladezeit signifikant reduziert. Im Normalbetrieb verkehrt die Linie mindestens 15,6 km beziehungsweise 62 Minuten (inklusive Wendezeit) unter Fahrdraht, 8,4 km beziehungsweise 28 Minuten Fahrzeit ohne Fahrleitung mit Batterie je Umlauf. Im Abendverkehr reduziert sich die Fahrt unter Fahrdraht auf 11,4 km beziehungsweise 32 Minuten.

Zum Einsatz kommen werksneue Fahrzeuge des Typs BGT-N1D vom Schweizer Hersteller Carrosserie Hess AG, welche nach einem EU-weiten Vergabeverfahren Ende 2018 bestellt wurden. Die Firma Hess besitzt langjährige Erfahrung im Fahrzeugbau und ist Vorreiter bei der Entwicklung und Produktion von Obussen. Mittlerweile wurden zur bestehenden Flotte von 15 eObussen 14 weitere Fahrzeuge aus der Rahmenvereinbarung zur Lieferung im Sommer 2021 (sieben) und im Frühjahr 2022 (sieben) abgerufen.

Die neuen eBusse sind 18,75 Meter lang und haben ein maximal höchstzulässiges Gesamtgewicht von 29 Tonnen (die „Elektromobilitätsstonne“ ermöglicht gemäß Gesetzgeber eine Überschreitung des bislang auf 28.000 kg begrenzten höchstzulässigen Gesamtgewicht). Sie verfügen über 38 Sitz- und 103 Stehplätze. An Tür 2 stehen zwei, nach neuesten Gesichtspunkten, gestaltete Rollstuhlplätze zur Verfügung und an Tür 3 erleichtert ein zusätzlicher Auffangraum den raschen Fahrgastwechsel. Die von bestehenden Fahrzeugen in Salzburg gewohnte Heckplattform an Tür 4 bleibt ebenso erhalten und bietet unter anderem bis zu drei Fahrrädern Platz. Für die optische Außeninformation sorgen eine große Frontanzeige und erstmals allseitig RGB-farbige Linien-signets. Im Innenraum zeigen zwei TFT-Monitore Informationen zur Fahrt (Liniennummer, Linienziel, Folgehaltestellen inklusive Umsteigemöglichkeiten) und anlassbezogenen Servicemeldungen.

E-Technik für den eObus

Der eObus verfügt über einen elektrischen Antrieb auf der mittleren Achse mit einem flüssigkeitsgekühltem Permanent-Magnet-Motor, welcher im Fahrleitungsbetrieb mit 600 Volt aus der Oberleitung wie auch aus der Batterie versorgt wird. Je nach Leistungsmanagement deckt die Batterie Lastspitzen oder speichert die Bremsenergie (Rekuperation, Abb. 4).

Die Batterie ist dabei über einen DC-DC-Wandler an den DC-Zwischenkreis angeschlossen. Im fahrleitungslosen Abschnitt dient ausschließlich die Batterie als Energiequelle.

Um den Energieverbrauch beziehungsweise die Dimensionierung der Batterie zu berechnen, wurden im Vorfeld mehrere Simulationen mit dem Ziel durchgeführt, die

Batterie so klein wie möglich, aber so groß wie notwendig zu dimensionieren. Hierbei wurden nicht nur die Traktion und sämtliche Verbraucher berücksichtigt, sondern auch Wirkungsgrad, Streckencharakteristik und Fahrverhalten waren notwendige Eingangsgrößen [5]:

Betrieb

- Haltestellenabstand,
- Störhalte,
- Staugefährdung,
- Fahrplangestaltung,
- Fahrzeugauslastung (Gewicht),
- Topographie (Steigungswiderstand),
- Streckenqualität (Rollwiderstand),
- Höchstgeschwindigkeit.

Fahrzeug

- Wirkungsgrad der Antriebstechnik,
- Luftwiderstand,
- Rekuperationsgrad,
- Ausführung und Verwendung von Nebenverbraucher,
- Ausführung und Verwendung von Heizung,
- Kühlung der Komponenten,
- Wirkungsgrad Batterie (und Fahrleitung).

Personal

- Beschleunigung,
- Fahrstil.

Die verschiedenen Belastungsprofile (entsprechend der Varianten) aus der Simulation, der Heiz- und Kühlbedarf je Jahreszeit, die Berücksichtigung von kalendarischer und zyklischer Alterung der Batterie, die Ladung über die Fahrleitung (bei Fahrt und im Stillstand) sowie eine praxistaugliche Reserve (inklusive Kompromissen wie zum Beispiel einer reduzierten Heizleistung im Notfall) haben schlussendlich zur sinnvol-

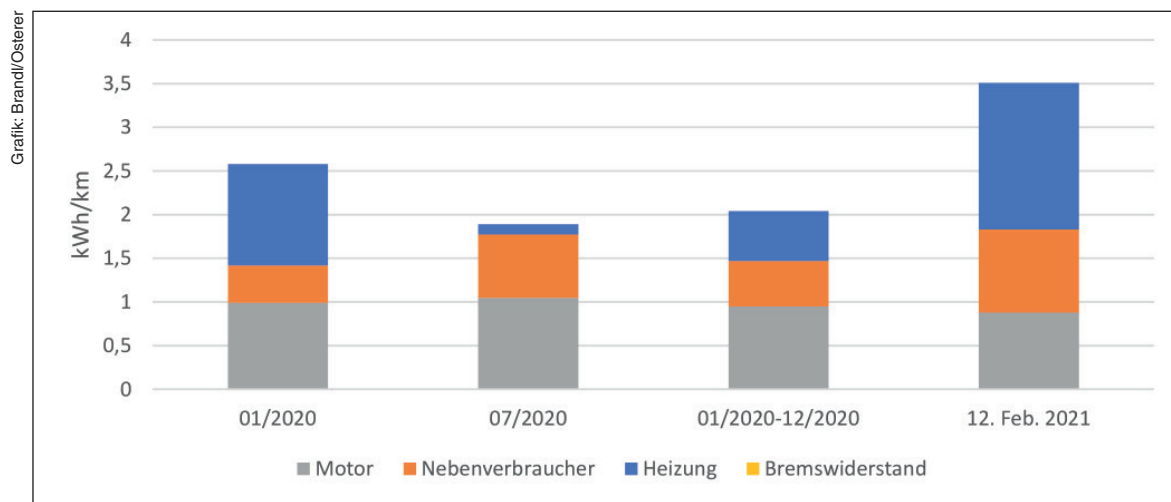


Abb. 5: Der durchschnittliche Verbrauch eines eObus liegt bei etwa 2 kWh/km und ist maßgeblich von der Heizenergie abhängig. Exemplarisch ist auch der 12. Februar 2021 angeführt: Der Verbrauch steigt bei maximaler Heizleistung auf 3,5 kWh/km.

len Dimensionierung der Traktionsbatterie mit 60 kWh geführt. Allerdings musste diese Batteriedimension auch „von der anderen Seite“ evaluiert werden, denn die Nachladedauer und die Belastung der Oberleitung spielen hier eine wesentliche Rolle. Unter Fahrleitung entnimmt der eObus Energie für die Traktionsleistung samt Nebenverbraucher (Batterietemperierung, Lüfter, Lüftung, Klima et cetera) und das Nachladen der Batterie. Durch das fahrzeugseitige Leistungsmanagement wird Direktverbrauch und Ladung optimal abgestimmt. Aus der begrenzten Ladeleistung von 100 A, welche aus der thermischen Belastung an der Schnittstelle Fahrleitung/Stromabnehmer resultiert, ergibt sich eine notwendige Ladezeit. Kombiniert mit der zur Verfügung stehenden Leistung des Fahrleitungsnetzes und der Berechnung der Abnahme an Energie entsprechend den betrieblichen Vorgaben (Fahrplan) ergibt sich so einerseits die

notwendige Ladezeit unter Fahrdraht, andererseits die Mindestanforderung an das Fahrleitungsnetz.

Das „selbstlernende Energie-Management-System“ sowohl für den Betrieb aus der Fahrleitung als auch aus den Batterien bietet die ideale Ladestrategie für die Traktionsbatterien. Es speichert anhand einer virtuellen Streckenkarte den jeweiligen Ladezustand der Batterien und den Energieverbrauch je Streckenabschnitt. So wird „vorausschauend“ nachgeladen und Spitzenlasten werden geglättet. Die Steuerung von Heizung, Lüftung und Klimatisierung ist so auch zur Schonung der Batterien optimiert. Damit kann auch das Fahrleitungsnetz optimal ausgenutzt werden, ohne dass man Gefahr läuft, es zu schnell zu überlasten.

Der mittlere spezifische Energiebedarf für den gesamten Fahrbetrieb des Obus-

systems in Salzburg betrug im Zeitraum Januar und Dezember 2020 2,28 kWh/km. Rechnet man auch das Fahrleitungsheizen im Winter, die Leitungswiderstände und andere Verbraucher im Netz dazu ein, so liegt der umgelegte Gesamtverbrauch bei etwa 2,44 kWh/km. Nur die eObuslinie 5 betrachtet, liegt der spezifische Energiebedarf im selben Betrachtungszeitraum bei durchschnittlich 2,04 kWh/km.

Der unterdurchschnittliche Energieverbrauch der eObuslinie 5 im Vergleich zum Gesamtnetz liegt einerseits in der Liniencharakteristik mit geringer Staueffährdung, gut bemessenen Haltestellenabständen und wenigen Störhalten (zum Beispiel an VL5A). Andererseits wird die beim Bremsen rückgewonnene Energie zu 100 Prozent im Fahrzeug verwendet, sei es, um die Nebenverbraucher und Heizung zu versorgen oder die Traktionsbatterie in kleinen Hüben zu laden.

Infrastrukturbedarf

Generell benötigen die neuen eObusse in Salzburg keine wesentliche, neue Infrastruktur. Speziell bei der Linie 5 wurde aber in der Planungsphase klar, dass die Energieberechnung mit ausreichenden Reserven eine Leistungsverstärkung im bestehenden Fahrleitungsnetz sinnvoll erscheinen lässt. Somit wurde ein zusätzliches Gleichrichterwerk entlang dem Linienweg mit einer Leistung von 1.000 kVA errichtet. An der Station Weidenstraße wurde im Zuge des Straßenumbaus auch die Fahrleitung angepasst, was einen separaten Strang zum automatisiertem Systemwechsel zwischen Batteriefahrt und Fahrt an der Fahrleitung in gerader Spur mittels Fahrleitungstrichter ermöglichte. Im Betriebs-



Abb. 6: In der Gemeinde Grödig verkehrt der eObus fast neun Kilometer je Umlauf ohne Fahrleitung.

werk waren – abgesehen von Modernisierungsmaßnahmen und der Anpassung auf die Fahrzeuglänge – keine nennenswerten Änderungen notwendig, ist man doch den Umgang mit der E-Mobilität in Salzburg seit über 80 Jahren gewohnt.

Die Leitstelle, ausgerüstet mit einem INIT-ITCS, welche bisher „nur“ den Betrieb der fast 100 Obusse im Salzburger Netz koordinierte, hat nun auch die Aufgabe, das Lademanagement der Batterien und damit den Ladezustand kontinuierlich und automatisiert zu überwachen. Sollte der Ladezustand eines Fahrzeuges kritisch sein, wird dies nicht nur dem Fahrer angezeigt, sondern die Leitstelle ist früh genug in der Lage, betriebliche Ersatzmaßnahmen einzuleiten.

Erkenntnisse nach dem ersten Betriebsjahr

Nach über einem Jahr Praxis kann nun die Simulation bestätigt werden. Die Dimensionierung der Batterie mit 60 kWh erweist sich heute als großzügig, allerdings ist die Zuverlässigkeit der Linie 5 (Verspätung, Kurzwenden et cetera) sehr hoch. Desweiteren ist der Alterungsprozess der Batterie noch nicht eingetreten. Im Übrigen war es immer auch ein Ziel, einen möglichst homogenen Fuhrpark zu betreiben und dabei auch die Entwicklungen in Zukunft zu berücksichtigen. So kann bei optimiert kleiner Fahrzeugreserve nahezu jede Diesel- beziehungsweise Erdgaslinie im städtischen Verkehr auf elektrische Antriebsform umgestellt werden. Und dabei werden nur punktuell Anpassungen des bestehenden Fahrleitungsnetzes notwendig.

Kleinstmögliche Batterien mit geringem Gewicht und regelmäßiger, schonender Nachladung während der Fahrt garantieren ein extrem sparsames E-Mobilitäts-System. Ein Verbrauch von circa

2 kWh/km von einem fast 19 m langen Gelenkbus im Alltagseinsatz ist ein unschlagbar niedriger Wert. Auch die Zuverlässigkeit des bewährten Systems Obus, kombiniert mit einer Batterie – mit ausreichender Reserve, konnte das erste Betriebsjahr eindrucksvoll beweisen: Keine einzige Fahrt ist auf Grund von nicht funktionierenden Traktionsbatterien oder zu geringer Dimensionierung ausgefallen. Auch die Kälteperiode im Februar 2021 stellte kein Problem dar. Allerdings stieg der Energieverbrauch am kältesten Tag auf 3,51 kWh/km an (Abb. 5).

Das automatische Ab- und Andrahten, letzteres mittels Trichter an der Fahrleitung, funktioniert rasch und reibungslos – und vom Fahrgast völlig unbemerkt. Die Überwachung des Ladezustandes durch die Leitstelle gibt Sicherheit, wurde aber in der Praxis dank Zuverlässigkeit des Systems zur Disposition nicht benötigt, wird aber bei zukünftiger Erweiterung an Bedeutung gewinnen.

Die bestehende Infrastruktur konnte für das System optimal genutzt werden und die Ergänzungen – im Wesentlichen das zusätzliche Gleichrichterwerk – waren überschaubar. Nicht zuletzt durch den geringen Verbrauch der eObusse beziehungsweise deren Glättung der Spitzenlast und (fast) vollständiger Rekuperation der Bremsenergie führen sogar zu einer Verbesserung des gesamten Energiemanagements im Fahrleitungsnetz. Und zu erheblichen Energieeinsparungen.

Fazit eObus

Mit der Umsetzung des Projekts wurden in allen Belangen Standardkomponenten eingesetzt und dies spiegelt sich auch in der hohen Verfügbarkeit der Fahrzeuge und im Zusammenspiel zwischen Infrastruktur und Fahrzeug wider. In Hinblick auf die Umset-

zung der CVD wird der eObus in Salzburg der Schlüssel zum Erfolg sein.

Die eObus-Flotte in Salzburg ist der beste Ansatz für einen rein elektrischen öffentlichen Verkehr und könnte durch die Vereinigung der bewährten Technologie Trolleybus mit der innovativen Batterietechnologie auch beinahe in jeder Stadt die Energiewende nachhaltig einleiten.

Es zeigt sich, dass für eine ausreichende Nachladung der Streckenabschnitt beziehungsweise die Ladezeit unter Fahrdracht idealerweise 50 Prozent betragen sollte, um die Batterie wieder vollständig zu laden. Wollte man den Abschnitt ohne Fahrleitung verkürzen, müsste man entweder die Batterie größer dimensionieren (was den Ladezustand trotzdem schrittweise reduzieren würde, da sich die Ladezeit verkürzt) oder man erhöht die Energieaufnahme, was einer veränderten Konfiguration der Schnittstelle Fahrleitung/Stromabnehmer bedarf. Bei neuen eObus-Systemen könnte man sich diese Möglichkeiten im Sinne reduzierter Fahrleitungsanlagen zu Nutze machen.

Spannend – für alle E-Bus-Betreiber – ist sicherlich das zukünftige Verhalten der Batterien im Alterungsprozess. Hier empfiehlt sich jedenfalls eine kalkulierbare Vereinbarung für dieses Risiko mit dem Hersteller.

Literatur/Anmerkungen

- [1] „In-Motion-Charging“ ist ein geschützter Begriff der Firma Kiepe Electric für ihre Batterie-Trolleybus-Ladetechnologie.
- [2] Klausner, S. et al (2018): Energieversorgung für Bahn und Bus, DER NAHVERKEHR 1+2/2018.
- [3] Faltenbacher, M. (2019): E-Busse in Deutschland: Status und Perspektive, DER NAHVERKEHR 11/2019.
- [4] Grafiken erstellt mit dem Fahrzeugmanagement-Tool der Firma Carrosserie Hess AG; Datengrundlage bilden die Fahrzeugdaten der eObusse der Salzburg AG.
- [5] ebusplan (2018): Technische Analyse – Variantenvergleich eObus, Salzburg AG.

Zusammenfassung/Summary

eObus: Dekarbonisierung nach einem Jahr Praxis

Die Kombination von „alter“ Obus-Technik mit „neuer“ Batterie- und Digital-Technologie ermöglicht die Synergie der größtmöglichen Vorteile für die E-Mobilität im ÖPNV in Salzburg. Der Batterie-Obus zeichnet sich dabei durch extrem geringen Verbrauch, höchste Zuverlässigkeit und bestmöglichem ökologischen Fußabdruck aus. Selbst extreme kalte Außentemperaturen bedeuten kein Problem bei der mehrmaligen Überwindung von 9 km ohne Fahrleitung. Gleichzeitig wird unter der Fahrleitung die Batterie des fast 19 m langen Gelenkobusses „sanft“ geladen, welche nebenbei die Spannungsspitzen im Fahrleitungsnetz sinnvoll reduziert. Die Technologie ist dabei nicht nur für Städte mit vorhandenem Fahrleitungssystem wegweisend, sie erscheint durchaus auch für viele andere Dekarbonisierungsprojekte im ÖPNV sinnvoll.

eTrolleybus: decarbonization after one year of practice

The combination of „old“ trolleybus technology with „new“ battery and digital technology enables the synergy of the greatest possible advantages for e-mobility in public transport in Salzburg. The battery trolleybus is characterized by extremely low consumption, maximum reliability and the best possible ecological footprint. Even extreme cold temperature does not mean a problem when overcoming 9 kilometers several times without catenary. At the same time, the battery of the almost 19-meter-long articulated trolleybus is „gently“ charged under the catenary, which by the way sensibly reduces the voltage peaks in the catenary-network at the same time. The technology is not only groundbreaking for cities with an existing catenary-network-system, it also makes sense for many other decarbonisation projects in public transport.