

Mythos Batteriebus

Entwurf Januar 2017

Jeder grössere und sich als fortschrittlich betrachtender Linienbusbetrieb meint sich heute ein paar Batteriebusse halten zu müssen. Dabei ist eigentlich jedem klar, dass sich mit den real existierenden Batteriebussen kein Verkehrs- und Umweltproblem löst. Dennoch herrscht Begeisterung. Die Techniker haben eine neue grosse Spielwiese und mit den damit verbundenen persönlichen Kontakten lernt man einige interessante Leute an diversen Orten kennen. Das Marketing kann mit viel Propaganda eine grossartige Zukunft versprechen die nicht so genau eingehalten werden muss wie der real existierende subfrugale Fahrplan. Die Finanzabteilung kann diverse Fördertöpfe abgreifen, so dass eine echte Chance besteht, den Batteriebusbetrieb, zumindest in den eigenen Büchern, günstiger hinzukriegen als mit Dieseln. Die Geschäftsleitung selbst macht sich bei den Politikern beliebt. Die Politiker wiederum sind zufrieden, dass ihre Fördertöpfe so umfangreich abgegriffen werden, so dass diese eigentlich erweitert werden müssten. Und all diese Glücklichen treffen sich immer wieder irgendwo bei irgendeinem Apéro Riche. Was will man mehr?

Nur, um so glücklich werden zu können ist es hilfreich von Physik möglichst gar nichts zu verstehen oder, falls doch, die stets latent vorhandene Fähigkeit zu besitzen dies gänzlich ausblenden zu können.

Es kann auch kein Lösungsbeitrag für die Umwelt sein, wenn sich ein Verkehrsbetrieb mit dutzenden bis hunderten von Bussen vier Batteriebusse hält. Die man aus vorerwähnten Gründen hegt und pflegt und die das Finanzergebnis so wie so nicht merklich beeinflussen.

Zugegebenermassen bis dahin polemisch, aber deswegen keineswegs ganz unrichtig.

Es gibt zum Batteriebus drei technische Grundproblemkreise. Erstens die Batterie selbst, zweitens die Anschlussleistung zum Laden der Batterien und drittens der eigentliche Ladevorgang der Batterien.

Ladung im Betriebshof

Ein 18 m Gelenkbus benötigt pro Kilometer etwa 2,5 kWh Energie (12 m Standardbus: ~1,5 kWh/km; 24 m Doppelgelenkbus: ~3,5 kWh/km). Bei einer täglichen Fahrleistung von 250 km werden folglich etwa 625 kWh Energie benötigt. Das würde dem Äquivalent von 60,8 l Diesel (37,4MJ/l) entsprechen. Da aber der Dieselmotor einen Wirkungsgrad von lediglich etwa 40 % erreicht und auch im Stillstand läuft sowie zusätzliche Nebenverbraucher Leistung erfordern, sind es effektiv wesentlich mehr. Betrachten wir zur Vereinfachung nachfolgend nur die Traktionsenergie.

Gehen vor davon aus, dass ein Betriebshof 100 Gelenkbusse beherbergt, dann fällt hier ein täglicher Energiebedarf von 62,5 MWh an. Jede Nacht sind während etwa 3 Std. alle Busse in Betriebshof, möchten wir dann alle Busse mit der entsprechenden Energie laden, wäre eine Anschlussleistung von 21 MW (62,5 MWh / 3 h) erforderlich. Das ist sehr viel. Zum Vergleich, ein neueres Kernkraftwerk, oder je nach politischem Standpunkt Atomkraftwerk, leistet etwa 1000 MW [1]. Diese Anschlussleistung ist nirgends einfach vorhanden. Dazu muss ein leistungsstarker Hochspannungsanschluss her.

Aber man kann den Energiebedarf besser verteilen, auf etwa 7 Std., da die ersten Busse früher in den Betriebshof gelangen und die Letzen diesen später verlassen. Auch damit ist immer noch

eine Anschlussleistung von ca. 14 MW erforderlich. Zudem müsste die Stromaufnahme der einzelnen Busse auf ihre Abfahrtszeiten hin programmiert werden. Besser wäre eine möglichst gleichmässige Verteilung des Energiebezuges über 18 Std., dann würde eine Anschlussleistung von 3,47 MW genügen. Da es aber Batteriebusse sein sollen, geht das Ausdehnen der Ladezeit auf 18 h nicht. Das gangbarste wäre, man würde die Batterieladung wie folgt verteilen: $\frac{1}{3}$ während der Nachtzeit zum Nachtarif, $\frac{1}{3}$ an den Endstationen und $\frac{1}{3}$ durch Mikroladung an den Unterwegshaltestellen.

Batterie

Eine herkömmliche Bleibatterie weist zum Speichern von 1 kWh ein Gewicht von etwa 30 kg auf. Somit würde eine Bleibatterie, die den gesamten Energiebedarf von 625 kWh für einen ganzen Betriebstag aufweist, etwa 18,75 t wiegen. Moderne Lithium-Ionen-Akkus mit 30 kWh (50 Wh/kg) erreichen samt Leistungselektronik und Kühlung ein Gewicht von 980 kg [2]. Dadurch wird sofort klar, dass es unmöglich ist, den gesamten Energiebedarf für einen ganzen Betriebstag auf dem Fahrzeug selbst zu speichern.

Das Gewicht einer Batterie mit 50 Wh/kg ist etwa 100-mal grösser als das von Diesel (11,8 kWh/kg x 40 %). Ebenso ist die Ladezeit einer Batterie mit mindestens 125 Min. (625 kWh / 300 kW, siehe weiter unten) etwa 100-mal länger als das Tanken von Diesel mit 1,2 Min. (130 l/Min., 10,27 kWh/l x 40 %). Nebenbei, ein Laden einer entsprechenden Batterie mit 300 kW (600 V x 500 A) ist eine echte technische Herausforderung, wenn nicht gar über mehr als zwei Stunden unmöglich. Zumindest wäre es alles andere als batterieschonend.

Fazit, ein Batterie ist 100-mal schwerer als Diesel und die Betankung einer Batterie braucht 100-mal länger als ein Dieseltank. Auch wenn sich die Batterien gewaltig verbessern, erreichen sie nie die Energiedichte von Diesel.

Ladung an Haltestellen

Unabhängig davon, ob die Batterien leistungsfähiger werden und die Anschlussleistungen in den Garagen und an den Haltestellen gewährleistet ist, bleibt der eigentliche Ladevorgang an den Haltestellen kritisch. Auf einem Bus wird die Traktionsspannung aus Isolations- und Sicherheitsgründen kaum je wesentlich mehr als 600 V betragen. Auch die Ladestromstärke muss begrenzt bleiben, faktisch wird der Grenzwert bei etwa 500 A liegen. Nebenbei, zum Lichtbogenschweissen per Hand werden Ströme von 30 – 200 A verwendet. 500 A sind also richtig viel Strom. Die zu übertragende Leistung beträgt demnach maximal etwa 300 kW (600 V x 500 A). Bei einer effektiven Batterieladezeit von 15 s ergibt das 4'500'000 J, respektive 1,25 kWh. Oder bei einem Brennwert von Diesel mit 37, MJ/l, etwa 1,2 dl Diesel. Berichtigt durch den Wirkungsgrad des Dieselmotors von 40 % ergeben sich somit 3 dl. Da dies jedoch alles Maximalwerte sind, dürfte das Äquivalent eher bei 2 dl liegen. Um aber eine effektive Ladezeit von 15 s zu erreichen muss der Bus sich etwa 25 s an der Haltestelle aufhalten. Denn er braucht bei jedem Ladeverfahren je etwa 5 s für das Kon- und Diskonnektieren, welches sich wiederum kaum wesentlich beschleunigen lässt, aber das grösste Verbesserungspotenzial aufweisen würde. Haltestellenaufenthaltszeiten von 25 s sind jedoch nur in stark frequentierten Haltestellen sinnvoll. Beträgt die Aufenthaltszeit nur noch 15 s, entspricht dies nur noch der Aufnahme von etwa 0,7 dl Diesel!

Heute betragen die Anschlussleistungen an Ladestellen etwa 250 kW, nach obenstehendem Beispiel wären es 300 kW, was sehr viel wäre. Kein Stromversorger hat Freude, wenn eine solche Leistung jeweils nur für Sekunden bezogen wird, ferner lässt er sich diese Spitzenbelastung dem entsprechend bezahlen. Also wird die Energie in den Ladestationen

zwischengespeichert um so die Spitzenlast zu senken. Dazu gehen wir davon aus, dass Unterwegs-Ladestationen nur dort installiert werden wo ein paar Buslinien in dichter Folge verkehren und so alle drei Minuten ein Bus vorbeikommt. Dann werden bei je 15 s Ladezeit pro Stunde 25 kWh (20 x 1,25 kWh) benötigt, daraus folgt über Stunden eine durchschnittliche und geglättete Anschlussleistung von dauernd 25 kW pro Haltekante, oder 50 kW pro Haltestelle für beide Fahrrichtungen. Das könnte in einigen Gegenden generell problematisch werden, denn diese Leistungen stehen kaum je einfach bereit. Sie übersteigen die Anschlussleistungen von normalen Hausanschlüssen bei weitem. Dadurch werden neue oder stärkere Trafostationen erforderlich. Das ist das eigentliche Grundproblem zur Ladung an Unterwegshaltestellen!

Da aber die Busse nicht im exakten zeitlichen Abstand folgen, muss die Ladestation so dimensioniert sein, dass auch einmal drei Busse im Abstand von nur je einer Minute folgen können. Dementsprechend muss eine beachtlich StromzwischenSpeicherung in der Ladestation selbst erfolgen. Dies wiederum setzt beachtlich grosse Ladestationen mit Trafos, Gleichrichter, Batterien und vor allem leistungsstarken Kondensatoren voraus deren Volumen bei weitem nicht in eine Telefonkabine passt.

Für die Übertragung der Energie von der Ladestation zum Bus gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten, entweder konnektiv mit einer Art von Pantograf auf dem Fahrzeugdach und einer Art kurzen Fahrleitung über der Haltestelle, oder induktiv mit einer Art Hochfrequenztrafo im Strassenbelag und auf der Unterseite des Fahrzeugbodens, so wie das System Primove von Bombardier [3]. Ersteres hat den Vorteil, dass es technisch einfacher ist und den höheren Wirkungsgrad aufweist, dafür aber Fahrleitungsabschnitte erfordert. Das Zweite kann fast unsichtbar gänzlich im Boden montiert werden, hat aber systembedingt einen kleineren Wirkungsgrad und ist technisch noch aufwändiger. Bei der konnektiven Ladung müssen die Kontakte stets sauber sein, was z. B. bei Laubbefall zum Problem werden kann. Die Induktive Ladung hat diesbezüglich keine Probleme.

Fazit, mit der Ladung auf Unterwegshaltestellen kann bei hohem Aufwand nur eine sehr bescheidene Energiemenge aufgenommen werden.

Betrieblich müssen die Ladestellen eine sehr hohe Verfügbarkeit aufweisen. Ist dies nicht der Fall, weil z. B. parkierte Autos oder Lieferwagen die Ladestelle versperren, ist der Abstand zwischen den Ladestellen so zu dimensionieren, dass zumindest die übernächste Ladestelle noch angefahren werden kann. Das erfordert eine entsprechende Energieredundanz in den Bussen mit dem entsprechenden Mehrgewicht an Batterien. Ist dies nicht gegeben, fallen ganze Linienabschnitte innert Kürze aus.

Da es durch ausserplanmässige Ereignisse immer wieder zu Betriebsstörungen kommt, ist es nicht zu verhindern, dass sich Busse der gleichen Linien auflaufen. Folglich müssen sich die Busse vor den Ladestellen anstellen. Auch wenn kein Fahrgastwechsel erfolgt, ist ein durchfahren an den Ladestellen nicht möglich. Damit wird die Wiederherstellung des Fahrplanbetriebes massiv erschwert.

Fazit, es braucht betrieblich mehr Unterwegsladestationen als technisch notwendig. Die verkehrlichen Probleme sind – besonders im Masseneinsatz - nicht lösbar.

Bleibt die Ladung an den Endstellen. An den Endstellen ist für die Busse zum Ausgleich der Fahrzeit und zur Einhaltung der Fahrplanzeit eigentlich immer eine Aufenthaltszeit eingeplant. Die kann zur Aufladung genutzt werden. Aber generell, die Ladezeit muss fahrplanmässig wie die Fahrzeit einkalkuliert werden, sie lässt sich nicht kürzen. Wenn wir davon ausgehen, dass da 5 Min. zur Ladung zur Verfügung stehen, dann kann damit das Äquivalent von maximal 5,2 l

Diesel (0,26 l in 15 s x 20) aufgenommen werden. Verlängert man die Ladezeit, so sind pro Buslinie schnell ein bis zwei zusätzliche Busse und deren Fahrer nur zur Einhaltung der Ladezeit erforderlich. Verkürzt man die Ladezeit, kommt man eventuell nicht ans andere Linienende. Pro zusätzlichen Bus dürften sich inklusive Personalkosten jährliche Gesamtkosten von mehreren 100'000 Euro ergeben! Allein dies ist für die Verkehrsunternehmen nicht hinnehmbar. Denn die stehen unter einem politisch motivierten Kostendruck, die Bestellerentgelte und Fahrgeldeinnahmen werden deshalb nicht erhöht.

Da bei Betriebsstörungen insbesondere an den Endhaltestellen die Fahrzeuge wieder in ihre Taktlage gebracht werden, ist hier eine 100 % Redundanz der Ladestellen erforderlich.

Fazit, die Endstellenaufenthaltszeiten müssen massiv länger werden. Dies ist für die Verkehrsunternehmen nicht finanzierbar.

Bustyp und Streckenverlauf

Kleinere Batteriebusse sind auf kurzen ebenen und wenig belasteten Strecken mit sehr entspanntem Fahrplan und tiefen Höchstgeschwindigkeiten bei längeren Endstellenaufhalten funktionstüchtig. Verdoppelt sich die Fahrgeschwindigkeit von durchschnittlich 15 km/h auf 30 km/h verdoppelt sich der faktische Energiebedarf. Auf Bergstrecken werden sie gänzlich obsolet. Um hinaufzufahren kann in den Batterien schlicht um zu wenig Energie mitgeführt werden und auf der Talfahrt kann die massiv anfallende Energie nicht in den Batterien aufgenommen werden.

Um einen energetisch sinnvollen Betrieb sicherzustellen, ist für jede Linie sowie jedes Fahrzeug ein separates an die Haltestellen und das Höhenprofil angepasstes Fahr- und Energiemanagement erforderlich.

Fazit, Bustyp und Linie müssen für jeden einzelnen Einsatzfall abgestimmt werden. Grosse Reisegeschwindigkeiten und ein grosses Passagierfassungsvermögen sind Killerkriterien.

Nebenverbraucher

Bis jetzt haben wir nur den reinen Traktionsenergieverbrauch betrachtet. In einem zeitgemässen Linienbus erwarten die Fahrgäste jedoch auch eine gute Beleuchtung und Klimatisierung. Beides wird die ganze Zeit benötigt. Gehen wir für die LED-Beleuchtung von einer Leistung von lediglich 300 W aus, so ergibt das über 18 h bereits zusätzliche 5,4 kWh. Für einen Bus von über 12 m Länge muss mit einer Heiz- und Kühlleistung von bis zu 39 kW gerechnet werden. Wenn der Bus also täglich 18 Stunden im Einsatz steht und dabei durchschnittlich lediglich 20 kW benötigt, wären dazu bereits 360 kWh erforderlich, was einer Ladezeit von mindestens 72 Min. entspricht! Im mitteleuropäischen Hochsommer und Winter wären es dann aber gut 140 Minuten. Der Energieverbrauch wird dann vergleichbar hoch wie der Traktionsenergieverbrauch! Das ist auch der Grund, wieso bei manchem heute üblichen Batteriebus die Heizung mit Diesel erfolgt. Air Condition ist dann zwangsläufig keine Option mehr!

Zusätzlich erwartet heute jeder Fahrgast eine Luftfederung sowie zum behindertengerechten Fahrgastwechsel das Kneeling an den Haltestellen. Das braucht sehr viel Druckluft. Dazu arbeitet ein Kompressor während ca. 50 % der Zeit mit 4 kW Leistung, was zusätzliche 36 kWh erfordert (4 kW x 18 h x 50 %).

Kommt dazu, dass sich die Batterie bei den massiven Lade- und Entladevorgängen sehr stark erhitzt, daher muss sie mit einer Klimaanlage gekühlt werden.

Fazit, die Nebenverbraucher verursachen für Komfort und Sicherheit einen der Traktionsenergie ähnlich hohen Energiebedarf.

Nebenaspekte

Ganz ausserhalb unserer Betrachtung haben wir die Verluste durch das stete Wandeln der Energie zwischen Stromnetz, Kondensatoren und Batterien mittels der Leistungselektronik und den Fahrmotoren / Generatoren gelassen. Der Gesamtwirkungsgrad wird kaum je auch nur 80 % erreichen!

Auch haben Batterien eine begrenzte Lebenserwartung. Die von den Herstellern garantierten Zyklen erstrecken sich, je nach Intensität der Nutzung, auch nur auf bis zu drei Jahren. Da die Batterien bis zu 50 % der Beschaffungskosten eines Busses betragen, hat kein Verkehrsunternehmen das notwendige Geld für die Gesamtlebensdauer der Busse die Batterien zu finanzieren, insbesondere da dazu dann keine Fördergelder mehr fliessen.

Egal welche Batterietechnik verwendet wird, deren Herstellung benötigt teure und seltene Rohstoffe sowie einen erheblichen Energieaufwand. Auch die Rücknutzungskonzepte sind stark optimierungsbedürftig.

Fazit, die Batterielebensdauer bleibt begrenzt und die Ersatzkosten sind ungeklärt. Der Gesamtwirkungsgrad ist unbefriedigend.

Gesamtfazit

Egal wie auch die Batterien verbessert werden, einen brauchbaren Stadtlinienbus mit Batterieantrieb wird es aus physikalischen Gründen kaum je geben!

All die aufgeführten Zahlen können in Prozenten angezweifelt und berichtigt werden, aber die Grundaussage, dass es den reinen Batteriebus kaum je geben wird, bleibt bestehen.

Chancen

Gibt es denn doch irgendwelche Möglichkeiten? Eigentlich nur den Trolleybus! Seit gut 130 Jahren gibt es den Oberleitungsbus und er bewährt sich gegenwärtig weltweit in etwa 48 Staaten mit gut 300 Bussystemen. Zudem ist er technisch ausgereift.

Der Trolleybus wird auf sehr lange Zeit der einzige taugliche Elektrobus bleiben. Bereits heute ist in fast allen Trolleybussen ein Notfahraggregat eingebaut. Bis jetzt waren es meist relativ kleine Benzin- oder Dieselmotoren aus dem Automobilbau. Damit liessen sich ein paar Kilometer mit geringer Geschwindigkeit überwinden. Mit der verbesserten Batterietechnologie kommen heute vorwiegend Batteriehilfsantriebe zu Anwendung. Auch damit lassen sich zuverlässig mehrere hundert Meter mit einer vernünftigen Geschwindigkeit überwinden. Diese Batteriesysteme leisten von 50 bis zu 120 kW, kurzfristig gar 220 kW [4]. Zum Einsatz kommen diese Systeme vorwiegend zur Umfahrung von Baustellen.

Die Tendenz geht dahin, dass die selten befahrene Dienstfahrleitungsverbindungen und in den Garagen die Fahrleitungsweichenstrassen reduziert werden. In städtebaulich empfindlicheren Abschnitten wird die Fahrleitung so schlank wie möglich ausgeführt und auf ein absolut notwendiges Mass reduziert. Das Einziehen und Anlegen der Trolleystromabnehmer geht schon heute im Stillstand halbautomatisch vom Fahrerplatz aus. Es wird derzeit an Systemen gearbeitet, die irgendwann möglicherweise auch während der Fahrt das Anlegen gestatten. Die Versuchsergebnisse sind derzeit aber völlig ernüchternd.

Aber das entscheidende bleibt, der überwiegende Streckenanteil wird mit Fahrdraht befahren!

Nur so kann genügend Energie aufs Fahrzeug gelangen. Nur so steht genügend Power auf Steigungen zur Verfügung. Nur so kann die Bremsenergie weitestgehend rekuperiert werden. Nur so können die Batterien des Hilfsantriebes schonend geladen werden. Nur das ist machbar!

In diversen Ländern wird die Ladeinfrastruktur für Elektroautos massiv gefördert. Aber der Trolleybus, der in etwa 100 PW ersetzt, wird nirgends gefördert. Das muss sich ändern.

Als störend wird oft die systemimmanente Fahrleitung empfunden. Gut die ist keine Augenweide, aber dafür ist für jedermann klar nachvollziehbar wo entlang der Trolleybus fährt, was wiederum ein Vorteil ist. Jede Infrastruktur hat sichtbare Spuren. Sind etwa Abfalleimer im öffentlichen Raum schön, oder Fussgängerstreifen? Geschweige denn Tankstellen? Kaum, wir nehmen sie hin und sind sogar froh drüber. Nur, beim Trolleybus und dessen Fahrleitung sei das alles ganz anders. Die Konnotation der Begriffe bestimmt die Schönheit.

Die Vorteile sind, ab einem Gleichrichterunterwerk können die Fahrleitungen im Umkreis von etwa 1,5 km gespeist werden. Denen Fahrleitungen entlang sind keine zusätzlichen Kabeltrassen erforderlich. Die Versorgung der Fahrzeuge erfolgt konstant und der Energiebezug ist fast gleichmässig.

Fazit, der moderne Trolleybus mit ergänzendem Batterieantrieb ist die gangbarste Lösung. Die Ladeinfrastruktur gehört gleich gefördert wie die für den ePW.

Randbemerkungen

Und, es sei noch ergänzt, Gas-, Hybrid- und allenfalls Wasserstoffbusse haben eher eine Zukunft als reine Batteriebusse. Auch sei erwähnt, mit dem vielgelobten Wasserstoffantrieb wird der Gesamtwirkungsgrad höchstens noch bescheidene 40 % erreichen!

Und es sei auch noch bemerkt, bei der Ausschreibung von Buslinien stehen insbesondere die kommunalen Busbetriebe im Gegenwind eines zunehmend härter werdenden Wettbewerbs. Da kommen die alternativen Bussysteme wie gerufen, denn damit lässt sich der Gartenhag um das eigene Gärtchen leichter erhöhen. Unter dem Deckmantel des Umweltschutzes kann der wirtschaftliche Leidensdruck leichter abgefedert werden. Denn kein privater Investor legt sich ein proprietäres Batteriebusssystem zu, das nicht einen adäquaten Wiederverkaufswert besitzt.

Ein Dank gebührt Trolley:motion für die Zurverfügungstellung von Basisdaten.

¹ Österreich:

Kraftwerk Schneiderau, ÖBB, max. 36 MW

Kraftwerk Diessbach, Salzburg AG, max. 26 MW

Kraftwerk Enzingerboden, ÖBB, max. 20 MW

Schweiz:

Kraftwerk Wassen, SBB, 28 MW

Kraftwerk Ritom, SBB, 33 MW

..Kraftwerk Zürich Letten, EWZ, 5 MW

² Doppelgelinktrolleybus Zürich, Hess, Vossloh Kiepe

³ Bombardier, Primove: <http://primove.bombardier.com/>

⁴ Doppelgelinktrolleybus Zürich, Hess, Vossloh Kiepe