

Seite 1 / 30

Vorbericht

über

Trolleybusverlängerung Rontal Linie 1 mit RBus System

Vorbericht zur Prüfung alternativer elektrischer Antriebsvarianten

An

Dienststelle für Verkehr und Infrastruktur des Kt. Luzern, vif, Ernst Schmid
Verkehrsverbund Luzern, VVL, Roman Steffen

Vom

3. November 2015

erstellt durch

Andreas Zemp, Leiter Technik
Christian Zumsteg, Leiter Rollmaterial

Mit Ergänzungen von
Roman Steffen, Verkehrsverbund Luzern VVL
Daniel Walker, Leiter Markt

Inhaltsverzeichnis

1	Summary, Empfehlung	3
2	Ausgangslage	5
2.1	Bestehende Fahrzeugflotte vbl	5
2.1.1	Investitionsschutz	6
2.2	Tendenzen im Bus – öV	8
2.3	Erprobungsstand elektrische Traktionssystemlösungen	9
3	Betriebliche Anforderungen an die Linie 1	10
3.1	Neue Linie 1 Obernau-Kriens-Luzern Bahnhof-Ebikon (-Mall of Switzerland)	10
3.2	Linienverlängerung versus Linientrennung	11
4	Traktionssystemlösungen mit Infrastruktur	12
4.1	Kontinuierliche Versorgung / durchgehende Fahrleitung	13
4.2	Partielle Fahrleitung mit Energy Pack	14
4.2.1	Einsatzgebiet partielle Fahrleitung	14
4.2.2	Einsatzgebiet bestehende elektrische Notfahrt / Energy-Pack	17
4.3	Regelmässige stationäre Nachladung der Batterien an Haltestellen (Systeme TOSA & Primove)	18
4.4	Einmallader Batteriebusse	20
4.5	Vergleich elektrische Ausrüstungsvarianten für Doppelgelenktrolleybusse / RBus	21
5	Trolleybusverlängerung Rontal konkret	23
5.1	Netz und Angebot	24
5.2	Beurteilung der Realisierungsmöglichkeiten Linienverlängerung Rontal konkret	25
5.2.1	Untervariante ohne Fahrleitung von Bushof Ebikon bis Mall of Switzerland (MoS)	26
6	Kostenvergleich elektr. Antriebssysteme	27
7	Literaturübersicht	28
8	Präsentationen aus e-bus Fachgruppen	28
9	Anhänge	29

1 Summary, Empfehlung

Ausgangslage

Für die Infrastruktur im öffentlichen Verkehr ist der Kanton, resp. die Dienststelle Verkehr und Infrastruktur (vif) zuständig. Der Verkehrsverbund Luzern (VVL) plant und finanziert den öffentlichen Verkehr im Kanton Luzern und führt die Geschäftsstelle Passepartout. Die vbl AG betreibt gewisse Trolleybuslinien im Auftrag des VVL, plant und baut, indirekt auch im Auftrag des vif, die für den Betrieb dieser Linien notwendigen Infrastrukturanlagen.

vbl hat die Batterietraction im Baustellenbereich bereits im Einsatz

In der Trolleybusstrategie des VVL aus dem Jahr 2013 (siehe [1]) wurden Grundsatzdiskussionen zu Traktionsfragen mit allen Partnern geführt. Nach einer Auslegeordnung konnten Leitplanken für weitere Investitionen und Projekte gesetzt werden. So wurde dannzumal festgestellt, dass die Entwicklung von Hybrid- und Elektrobusen in vollem Gange ist sowie verschiedene alternative Antriebskonzepte noch im Versuchsstadium sind. Life-Cycle-Kosten und Zuverlässigkeitsangaben zu solchen Systemen waren und sind noch immer weitgehend unbekannt.

Um von der betrieblich vorteilhaften, höheren Antriebsleistung und vom emissionsfreien und leisen Notfahrbetrieb zu profitieren, wurden die 9 bereits beschafften RBusse (Doppelgelenktrolleybusse) mit elektrischen Energiespeichern (Batterienotfahrt) ausgerüstet, womit auf Dieselnoteaggregate verzichtet werden konnte. Ähnlich der heutigen Notfahrt mit Dieselnoteaggregaten kann mit einem Trolleybus damit ein reduzierter Betrieb, z.B. bei Umleitungen oder Baustellen bereits angeboten werden. Die für das öV Angebot gemäss AggloMobil (www.vvl.ch/agglo Mobil) weiteren nötigen RBusse (für die Linien 2 und 8) werden aktuell mit derselben Konfiguration bestellt, um einen flexiblen Fahrzeugeinsatz auf dem ganzen Luzerner Trolleybusnetz sicherzustellen. Ähnlich wie in Zürich und Genf wird damit die partiell fahrleitungslose Fahrt von Trolleybussen für befristete Zeitbereiche schrittweise möglich, wenn auch künftige Einsatzorte dieser Möglichkeiten heute noch nicht unter den Partnern ausdiskutiert sind.

Je nach Einsatzbedingungen sind die Traktionsbatterien während der zwanzigjährigen Betriebszeit des Doppelgelenktrolleybusses (RBus) 2 bis 3 Mal auszutauschen (kann bei intensiver Nutzung noch häufiger der Fall sein). Es kann davon ausgegangen werden, dass bei einem solchen Batteriewechsel in einigen Jahren etwas höhere Kapazitäten oder etwas günstigere Kosten erreichbar sind.

Erkenntnisse und Empfehlung für Trolleybusverlängerung Rontal:

Nach erneuter Prüfung aller relevanten Fakten kommt das vif nach Abklärung der von vbl und VVL eingereichten Unterlagen zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Die abschnittsweise und zeitlich befristete, fahrleitungslose Fahrt mit elektrischer Traktion ist für 9 Trolleyfahrzeuge bereits Realität, wobei den Fahrgästen in solchen Fällen nur reduzierte Komfortfunktionen angeboten werden können. Die vorhandene Batterie - Lösung kann die durchgängige Fahrleitung Maihof-Ebikon sowie Ebikon-Mall of Switzerland (MoS) nicht ersetzen; die verfügbaren Batterieleistungen sind dafür wesentlich zu klein.
- Eine integrierte Batterielösung mit grösseren Batterien (EnergyPack im Trolleybus) ist aktuell nur für kurze fahrleitungslose Abschnitte verfügbar, jedoch nicht für die Trolleybusverlängerung Rontal mit einer Streckenlänge von rund 5 km.
- Die elektrische Antriebslösung TOSA oder Primove (siehe Kap. 4.3) mit punktueller Nachladung an den Haltestellen ist zum heutigen Zeitpunkt nicht in einem betriebserprobten Zustand verfügbar und kann aufgrund fehlender Kompatibilität nicht wirtschaftlich in ein bestehendes Trolleybusnetz / Trolleybusflotte integriert werden.
- Die Anwendung von verschiedenen Systemen auf einer Linie (z. Bsp. Trolleybus und TOSA) ist für die Verlängerung der Linie 1 nicht geeignet, da ein zusätzlicher Umsteigevorgang für die Kunden notwendig würde.
- Zudem muss festgehalten werden, dass die öffentliche Hand ihre eingeschränkt verfügbaren Mittel nur in ausgereifte und erprobte elektrische Antriebssysteme im öV zur Verfügung stellen kann.

Die Trolleybusverlängerung Rontal soll darum durchgängig mit Fahrleitung erschlossen werden. Dies mit dem Ziel, die Kosten, die vorgegebenen Termine und die erforderliche Zuverlässigkeit einhalten zu können.

- Ein durchgängiges Trolleybussystem ist erprobt, zuverlässig, wirtschaftlich, energieeffizient, leise und lokal emissionsfrei.
- Eine fahrleitungsfreie Erschliessung ausschliesslich für das Rontal ist technisch noch nicht reif resp. unter wirtschaftlichen Kriterien nicht verfügbar. Zudem müsste zur Erreichung Betriebssicherheit und Fahrplanstabilität eine eigene öV Fahrspur zur Verfügung gestellt werden können.
- Ein Systembruch und somit ein Umsteigen für die Fahrgäste bei der letzten Haltestelle auf Stadtgebiet (Haltestelle Maihof) wird von den Fahrgästen erfahrungsgemäss nicht akzeptiert. Eine Umrüstung der bestehenden Flotte generiert zusätzliche Kosten und betriebliche Risiken → die Bereitschaft seitens des öV-Bestellers, diese Mehrkosten und die erhöhten Risiken für Systeme im Status Entwicklung und Prototyp zu tragen, ist nicht vorhanden.
- vbl ist auf dem Wege, wie andere Transportunternehmungen, mit dem Batteriepaket kurze Strecken für Baustellen und Ereignisse befristet fahrleitungsfrei zu betreiben.

Ausblick:

Die Beschaffung der neuen RBusse für die Linien 2 und 8 läuft. Die Fahrzeuge werden mit dem bekannten Batterie Notfahrttaggregat ausgerüstet. Dieses Modul ist geeignet für betrieblich befristete Ausnahmesituationen (z.B. Baustellen und Anlässe).

Für die Zukunft bleiben das vif, der VVL und die vbl AG weiterhin aktiv, um neue Technologien mit notwendiger Zuverlässigkeit und entsprechender Wirtschaftlichkeit zu verfolgen. Ziel ist es, weiterhin attraktive öV-Angebote für die Fahrgäste zu erbringen und gleichzeitig die öffentlichen Mittel wirtschaftlich einzusetzen.

Durch die Anwendung von Traktionsbatterien verschieben sich Aufwandpositionen von der Infrastruktur auf die Fahrzeuge. Die Bereitschaft, zukünftig in möglicherweise erhöhte Investitions- und Betriebskosten für fahrleitungslose elektrische Traktionstechnologien zu investieren, muss zwischen der Stelle Verkehr und Infrastruktur vif und dem Besteller VVL abgesprochen und koordiniert werden.

2 Ausgangslage

Der öV Bericht 2014 – 2017 (B 93 vom 12. November 2013) sieht die Ausdehnung der frequenzstärksten öV Linie 1 der Stadt und Agglomeration Luzern bis zum neuen Bushub in Ebikon und zur Mall of Switzerland mit der RBus Systemlösung, d.h. mit dem erhöhten Standard für Doppelgelenktrolleybuslinien, vor (siehe [3]). Mit dem Regierungsratsbeschluss vom 17. März 2015 wurden die Projektierungskosten für die Trolleybusverlängerung nach Ebikon / Rontal [Trolleybusverlängerung Rontal] (einschliesslich Prüfung alternativer elektrischer Antriebsvarianten) und für den Bushof Ebikon genehmigt (siehe [4]).

Der Auftrag zur Planung der Trolleybusverlängerung Rontal wurde durch das vif aufbereitet und am 24. April 2015 an vbl erteilt.

Per Ende 2016 wird das vif mit einem Bau- und Auflageprojekt den Ausführungsantrag an den Kantonsrat vorbereiten. Darin werden die Überlegungen und Befunde zu alternativen elektrischen Antriebsarten im Hinblick auf den Realisierungsantrag an den Kantonsrat einfließen.

Ziel ist, dass die Trolleybusverlängerung Rontal per Ende 2019 in Betrieb gehen kann. Darum müssen alle Planungsarbeiten für das Bau- und Auflageprojekt durch alle involvierten Stellen und Partner umgesetzt werden.

Die gültige Trolleybus Strategie vom 12. Februar 2013 des Verkehrsverbund Luzern VVL sieht nach einer umfassenden und breiten Auslegeordnung durchgängig elektrifizierte Trolleybus-Systemlösungen für Linien mit hohem Kapazitätsbedarf und hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit, d.h. die RBus Systemlösung für Doppelgelenktrolleybuslinien, vor (siehe [1]).

Parallel schreitet die Entwicklung der Elektromobilität mit neuen Lösungsansätzen voran. In verschiedensten Test- und Pilotprojekten, meist unterstützt durch öffentliche Fördergelder, wird von neuen Lösungen mit partieller Fahrleitung, von Batteriebusen mit Einmalladung oder mit Nachladungssystemen berichtet. Der VVL und die vbl AG verfolgen diese Projekte mit grossem Interesse und prüfen laufend die betriebliche und wirtschaftliche Einsetzbarkeit alternativer elektrischer Antriebsvarianten für öV-Busse.

Mit diesem Bericht werden die Entscheidungsgrundlagen für die Wahl der elektrischen Antriebsvariante, d.h. der elektrischen Gesamtsystemlösung der Trolleybusverlängerung Rontal, für einen langfristig wirtschaftlichen und zuverlässigen öV Betrieb für die frequenzstärkste Linie der Stadt und Agglomeration Luzern mit gegen 10 Millionen Fahrgästen pro Jahr, d.h. für das konkrete Projekt Trolleybusverlängerung Rontal bereitgestellt. Eine hohe Zuverlässigkeit ist notwendig; gleichzeitig müssen die technischen und wirtschaftlichen Risiken minimal gehalten werden.

Das Agglomerationsprogramm der Stadt Luzern, zweite Generation, sieht zudem die Elektrifizierung der Linie 12 im Zeitbereich 2019 – 2022 vor. Das Agglomerationsprogramm, dritte Generation, sieht weitere Erschliessungen mit elektrischer Antriebstechnik vor. Wirtschaftliche und entsprechend verfügbare Systemlösungen werden jeweils in regelmässigen Abständen neu beurteilt.

2.1 Bestehende Fahrzeugflotte vbl

Bis 2013 wurde in Luzern ein Trolleybusfahrzeugpark mit vier Fahrzeugtypen betrieben: Normaltrolleybusse, Anhängerzüge, Gelenktrolleybusse und Doppelgelenktrolleybusse. Mit der Ablösung der letzten Anhängerfahrzeuge wird die Flotte nur noch aus zwei Gefässgrössen bestehen (Gelenktrolleybusse und Doppelgelenktrolleybusse). Damit kann die Kapazität für das künftige Angebot erreicht werden. Gleichzeitig wird eine höhere Einsatzflexibilität erreicht, weil sich durch die Reduktion der Fahrzeugtypen betriebliche Vorteile bei der Fahrzeugeinteilung und bei der Fahrzeugreservehaltung ergeben. Aus betrieblichen Gründen und auch aus Kostengründen ist es wichtig, dass sämtliche Gelenktrolleybusse auf allen Gelenktrolleybuslinien und sämtliche Doppelgelenktrolleybusse auf allen RBus-Linien flexibel eingesetzt werden können.

Bei der Trolleybusverlängerung Rontal nach Ebikon handelt es sich um eine Linienverlängerung der bestehenden Linie 1, welche bis Ebikon Bahnhof drei zusätzliche Fahrzeuge benötigt. Die Fahrzeuge müssen auf der ganzen verlängerten Linie 1 eingesetzt werden können.

Die neun letztbeschafften Doppelgelenktrolleybusse (Lieferung 2014) verfügen bereits über eine Traktionsbatterie. Diese erlaubt es bei Baustellen oder bei Sonderanlässen einen zeitlich und leistungsmässig begrenzten Sonderbetrieb der Fahrzeuge; und dies, ohne Emissionen und ohne Lärm zu erzeugen. Am Fastnachtsumzug Kriens im Februar 2015 konnte deshalb eine kundenfreundlichere Umleitungsstrecke gewählt und betrieben werden. Mit der künftigen Entwicklung im Batteriebereich werden sich die Möglichkeiten der Batterietraction verbessern. Es ist zu erwarten und davon auszugehen, dass beim Batterieersatz (je nach Einsatz nach ca. 5 bis 8 Jahren) die Kosten der Batterien weiter sinken werden und die Speicherkapazität weiter verbessert werden kann.

2.1.1 Investitionsschutz

Die vbl AG betreibt bewährte Trolleybusse mit durchgängiger Fahrleitungsversorgung verschiedener Generationen.

NT Normaltrolley 12m Hochflur	1989	7 Fahrzeuge mit Anhänger
GT Gelenktrolley 18m Niederflur	2004	8 Fahrzeuge
GT Gelenktrolley 18m Niederflur	2006	2 Fahrzeuge
GT Gelenktrolley 18m Niederflur	2009	16 Fahrzeuge
Doppelgelenktrolleybusse 24m Niederflur	2006	3 Fahrzeuge
Doppelgelenktrolleybusse 24m Niederflur	2014	9 Fahrzeuge RBus (elektrische Notfahrt)

Die Fahrzeuge werden langfristig betrieben und über 20 Jahre abgeschrieben.

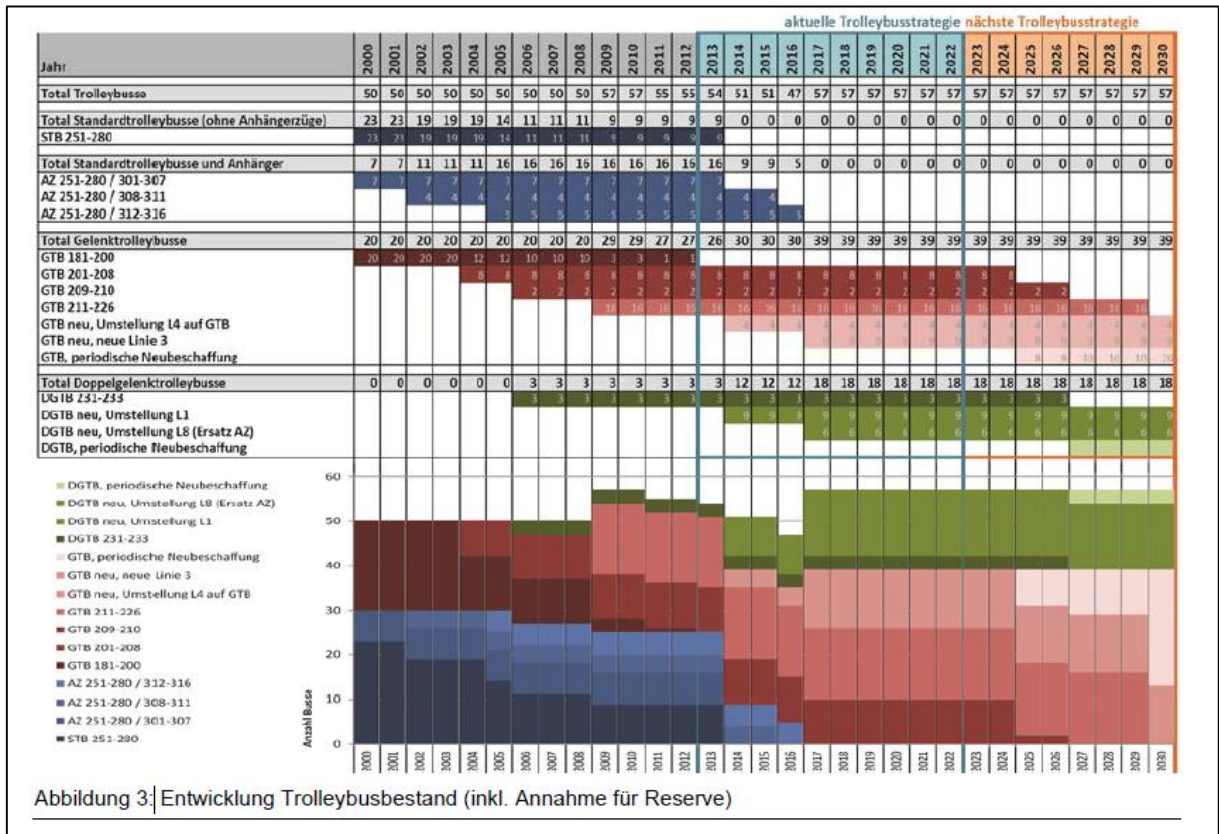


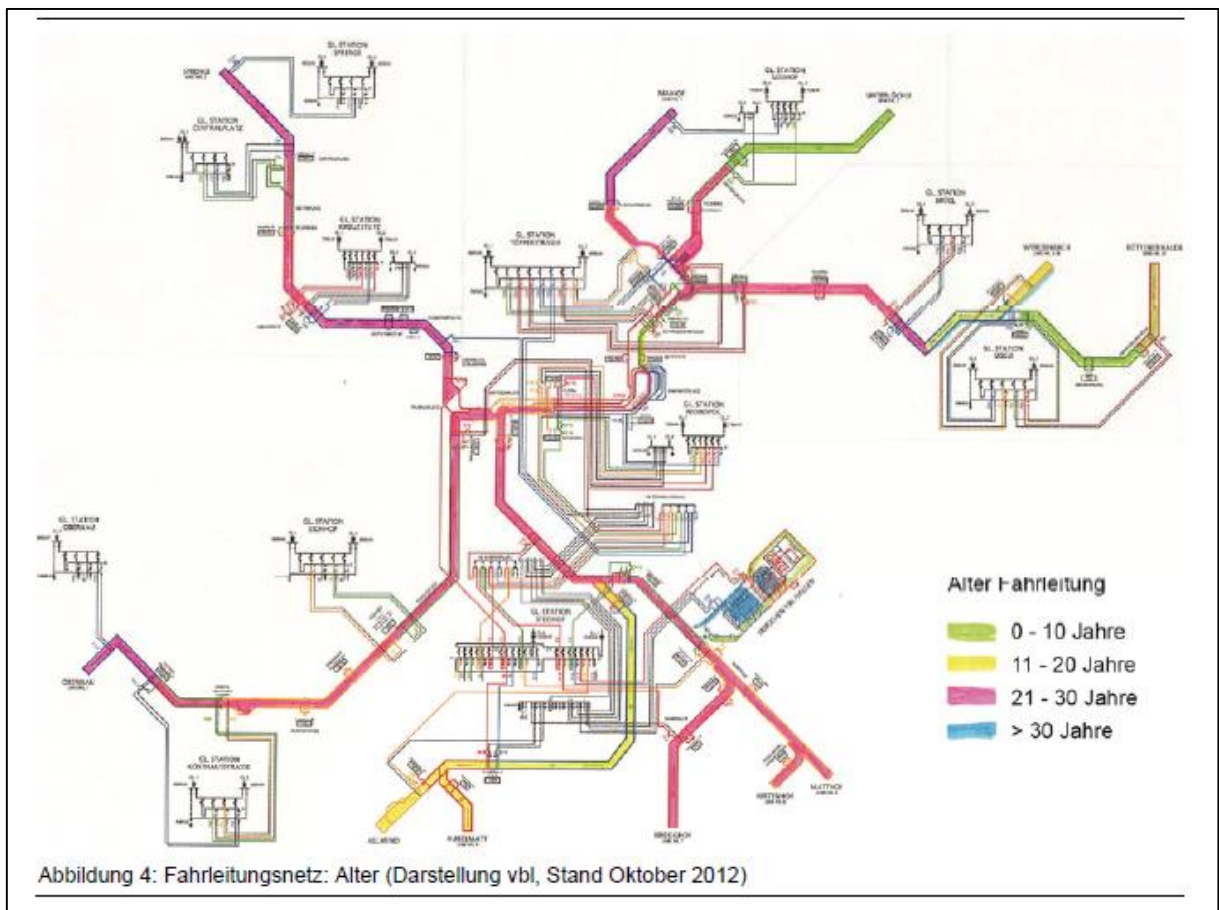
Abbildung 3: Entwicklung Trolleybusbestand (inkl. Annahme für Reserve)

Auszug aus der VVL-Trolleybusstrategie, 12. Februar 2013

Aus wirtschaftlicher und Fahrzeug-Reservehaltungssicht leitet sich darum die Anforderung ab, dass es zwingend ist, dass die gesamte Trolleybus-Fahrzeugflotte flexibel auf allen elektrifizierten öV-Linien eingesetzt werden kann.

An dieser Stelle sei der Hinweis angebracht, dass neue Antriebs-Technologien, vor allem Traktions-Batterien, in kürzerer Zeit abgeschrieben werden müssen. Nach heutigem Kenntnisstand müssen diese Systeme – je nach Nutzung und Belastung – für befristete Ereignisse innerhalb von 5 bis 8 Jahren erneuert werden. Die Gesamtkosten über den gesamten Lebenszyklus dieser Technologien sind heute noch nicht detailliert und gesichert bekannt. Es zeigt sich bereits in den ersten Betriebsjahren, dass die in Luzern, Zürich und Genf eingesetzten Traktionsbatterien ebenfalls einen Wartungs- und Betreuungsaufwand benötigen.

Für alle Trolleybuslinien mit einer Gesamtlänge von 37.6 km wird ein Trolleybusfahrleitungsnetz mit entsprechenden Gleichrichterstationen zur kontinuierlichen Versorgung der Fahrzeuge mit 600 Volt Gleichstrom betrieben. Die Fahrleitungs-Infrastruktur wird über 30 Jahre abgeschrieben.



Auszug aus der VVL-Trolleybusstrategie, 12. Februar 2013

Der grösste Teil des Fahrleitungsnetzes wurde zwischen 1985 und 1990 erneuert. Die Instandhaltung der Fahrleitungsanlagen erfolgt periodisch und nach Notwendigkeit. Streckenabschnitte, welche sich am Ende ihrer Lebensdauer befinden, werden je nach Zustand und Alter abschnittsweise erneuert.

Die abschnittsweise notwendigen Gleichrichterstationen wurden in den vergangenen 7 Jahren, wo notwendig, erneuert und, um den steigenden Versorgungsansprüchen gerecht zu werden, ausgebaut.

Die Fahrleitung sowie die Gleichrichterstationen sind für eine wirtschaftliche Lebensdauer von 30 Jahren ausgelegt.

Standort	Baujahr	Ende Lebensdauer	Leistung
Steghof	1962 / 1976 / 1989	ca. 2019	2x 1450 kW
Maihof	1999	ca. 2029	2x 730 kW
Kreuzstutz	1965 / 2003	ca. 2033	2x 730 kW
Monopol	2004	ca. 2034	2x 730 kW
Brühl	1965 / 2010	ca. 2040	2x 800 kW
Sprengi	2011	ca. 2041	2x 800 kW
Kosthausstrasse	2011	ca. 2041	2x 800 kW
Töpferstrasse	1949 / 1976 / 2012	ca. 2042	2x 800 kW
Emmenbrücke	1965 (Abbruch 2013)	2013	1x 720 kW
Centralplatz (Projekt)	2012/13	ca. 2043	1x 800 kW
Giseli (Projekt)	2012/13	ca. 2043	2x 800 kW
Eichhof (Projekt)	2013	ca. 2043	2x 800 kW
Obernau (Projekt)	2013	ca. 2043	1x 800 kW

Tabelle 4: Übersicht Gleichrichter und Schaltanlagen im Trolleybusnetz Luzern

Auszug aus der VVL-Trolleybusstrategie, 12. Februar 2013

Zusätzlich ist in der Zwischenzeit die Dezentralisierung der Stromversorgung ab Steghof vorangetrieben worden. Im Rahmen des entsprechenden Neubaus durch die ewl AG ist die Gleichrichterstation Steghof erneuert worden. Für die neue Gleichrichterstation Tribtschen-Wartegg sind Planungsarbeiten im Gange.

2.2 Tendenzen im Bus – öV

Die Treiber für die Förderung der elektrischen Mobilität liegen auf der Hand.

- Praktisch keine lokale Emissionen, Reduktion CO₂ Ausstoss
- Lärmarmen Betrieb
- Energieeffizienter Betrieb – Energiestrategie des Bundes
- Vermehrte Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen
- Optimierung der Fahrgastkapazität pro Fahrzeug

Zahlreiche Pilot- und Forschungsprojekte mit neuen elektrischen Antriebsvarianten werden aktuell – meist mit Fördergeldern aus der öffentlichen Hand – unterstützt und aktuell durchgeführt. Nachfolgend eine Auswahl von Pilotprojekten:

- TOSA, Genf Batteriebus mit regelmässiger Nachladung TOSA/ABB im Pilotbetrieb
- VBSG, St. Gallen Trolleybus mit Energypack mit partieller Fahrleitung Pilotbetrieb abgeschlossen
- PAG, Brugg Wasserstoff / Batterie / Brennstoffzellenbus im Pilotbetrieb
- Braunschweig, DE Batteriebus mit regelmässiger Nachladung Primove/Bombardier im Pilotbetrieb
- Braunschweig, DE Solaris Urbino electric 12 m
- Berliner Verkehrsbetr. Solaris Urbino elektric 12 m mit Bombardier Primove
- Eberswalde, DE Oberleitungshybridbus – gefördert im Rahmen des EU-Projektes, Trolley'. Ziel 4 Kilometer einer 18 km-Linie oberleitungsfrei zu fahren.
- Emile Weber Luxembourg: Doppelgelenk-Hybrid, 3 Fahrzeuge seit Januar 2015
- Wiener Linien, AUT Testbetrieb Rampini Alé EL, elektr. Midibus
- KVB, Köln Testbetrieb VDL Gelenkbus mit Nachladung (ca. Ende 2015)
- ZVB Zug mit SOB Testbetrieb mit einem 12 m Elektrobus vorgesehen ab Ende 2015
- Chur Testbetrieb mit einem Elektrobus (Midibus)
- BVB, Basel Testbetrieb mit zwei Elektrobussen (Midibus) 2015 durchgeführt
- etc.

Nach aktuellem Stand der Entwicklungen werden für kleinere Fahrzeuge bis zu 12 m Länge Lösungen mit reinen Batteriefahrzeugen erprobt. Für grössere Fahrzeuge, d.h. für Gelenk- oder Doppelgelenk-Trolleybusse werden Ansätze mit regelmässiger Nachladung aus der Fahrleitung oder zusätzlicher Ladeinfrastruktur getestet. Die Verwendung von Ladeinfrastruktur auf der Strecke, wird von den meisten Fahrzeuganbietern für grössere Fahrzeuge bevorzugt.

2.3 Erprobungsstand elektrische Traktionssystemlösungen

Bei den oben genannten Pilot- und Forschungsprojekten handelt es sich bisher um einzelne Fahrzeuge im Versuchsbetrieb. Zahlreiche Pilotversuche stellen zukünftig weitere Testresultate in Aussicht. An folgenden Standorten ist eine Erweiterung der Batterietraktion auf ganze Linien oder in erhöhter Fahrzeuganzahl geplant und in Vorbereitung.

VBZ Zürich: Nachrüstung bestehende Trolleybusse mit Batterietraktion. Danach ist eine Flotte von 31 Doppelgelenktrolleybussen, 39 Gelenktrolleybussen verfügbar. Der Betrieb ohne Fahrleitung am Albisriederplatz erfolgte ab dem 19. Mai 2015. Der Albisriederplatz soll nach dem Abschluss der Bauarbeiten trolleybusfahrleitungslos sein. Insbesondere die komplizierte Kreuzungssituation mit der Tramfahrleitung kann damit vereinfacht werden.

Ziele: Vermeidung von komplizierten und teuren Fahrleitungsweichen (Kreuzungen Tram – Trolleybus), Elektrische Traktion im Stadtbereich sowie eine erhöhte betriebliche Flexibilität beim Trolleybus.

TOSA Genf: Aufbau der weltweit ersten Buslinie mit dem TOSA-System. Der Start der Beschaffung erfolgte 2015. Es handelt sich um die Linie 23 mit einer Streckenlänge 17 km (Tours de Carouge-Aéroport-P+R 47) mit 2 Mal 26 Haltestellen und total 13 Ladestationen. Die Inbetriebnahme ist auf 2017 geplant. Es handelt sich um eine separate Technologie, eine separate Linie und separate Fahrzeuge, womit keine Synergien zum bestehenden Trolleybusbetrieb bestehen. Gemäss einer Pressemitteilung vom 9. September 2015 hat der Regierungsrat in Genf einen Investitionskredit von CHF 15'000'000.- für die Erstellung der Pilot-Linie 23 der transports publics genevois (TPG) mit der TOSA-Technologie genehmigt.

Das Hauptziel des TOSA-Projektes besteht darin, dass die elektrische Traktion im Stadtbereich den Einsatz von Dieselnissen (CO₂-Einsparung, Verwendung erneuerbare Energie, Luftreinhaltung, Lärmverminderung, Pionierprojekt etc.) zu ersetzen vermag.

VBSG Verkehrsbetriebe St.Gallen: Die VBSG haben den Pilotbetrieb, mit Trolleybus und EnergyPack fahrleitungsgelos über den Bahnhofplatz zu fahren, aufgrund ungenügender betrieblicher Zuverlässigkeit abgebrochen. Die VBSG werden den Bahnhofplatz St. Gallen weiterhin mit einer durchgängigen Fahrleitungsanlage ausrüsten.

Bushersteller präsentieren an internationalen Fachmessen zunehmend die neusten Elektromobilitäts-Fahrzeuge. Nach wie vor handelt es sich um Prototypen oder sehr kleine Stückzahlen.

3 Betriebliche Anforderungen an die Linie 1

3.1 Neue Linie 1 Obernau-Kriens-Luzern Bahnhof-Ebikon (-Mall of Switzerland)

Die Trolleybuslinie 1 ist die frequenzstärkste Linie von vbl. Sie wird künftig den ganzen Tag durchgehend im 7,5 Min.-Takt von Obernau-Kriens nach Luzern Maihof und weiter bis Ebikon (-Mall of Switzerland) verkehren. Die Linie wird durchgehend mit Doppelgelenkbussen ausgestattet sein, so dass die rund 13 Mio. Fahrgäste jährlich sicher, zuverlässig und mit der genügend grossen Kapazität transportiert werden können. Die Linie 1 wird – wie die beiden anderen Linien 2 und 8 – im RBus-Standard verkehren, d.h. grosse, moderne Fahrzeuge, ein attraktives Angebot und eine abgestimmte Infrastruktur (Busbevorzugungsmassnahmen) aufweisen.

Verschiedene Busbevorzugungsmassnahmen auf der ganzen Linie 1 sind im Kantonalen Strassenbauprogramm aufgelistet. Bis 2022 sollen sämtliche Massnahmen umgesetzt werden. Sollten die Busse nicht genügend bevorzugt werden können, müssten zusätzliche Busse im Fahrplan vorgesehen werden, damit eine entsprechende Zuverlässigkeit auf der ganzen Linie von Obernau bis Ebikon gewährleistet werden könnte. Dies würde aber zusätzliche Betriebsmittel (Mehrkosten im Betrieb) ohne entsprechendes zusätzliches Angebot bedeuten. Ein solcher Betrieb würde ineffizienter und teurer.

Aufgrund der geplanten Reserve ist auf der Linie 1 ein effektiver Betrieb gewährleistet. Unterhaltsarbeiten an den Fahrzeugen können somit durchgeführt werden und trotzdem ist die ganze Linie künftig mit den einheitlichen Fahrzeugen (Doppelgelenktrolleybusse) ausgerüstet. vbl unterhält allerdings – in Absprache mit dem VVL keine betriebliche Reserve für diese Linie. Das heisst, im Notfall werden andere Fahrzeuge, z.B. Gelenktrolleybusse oder Dieseldieselbusse, auf der Linie eingesetzt. Dies bedeutet wiederum, dass sämtliche Busse auf der Linie 1 (und auch auf allen anderen Trolley- bzw. Doppelgelenktrolleybus-Linien) eingesetzt werden müssen.

Die Umläufe der Linie 1 sind so gestaltet, dass die Linie im normalen Verkehrsaufkommen (Regelbetrieb) funktioniert. Es sind aber keine grossen Wendezeiten eingeplant, um den Einsatz des Personals und der Fahrzeuge effizient zu gestalten. Dies bedingt wiederum, dass keine übermässigen Verkehrsbehinderungen und Staus auf der ganzen Linie von Ebikon bis Obernau auftreten dürfen.

Die mit Doppelgelenktrolleybussen betriebenen Linien 1, 2 und 8 verkehren als RBus, d.h. auf ihnen wird ein erhöhter Qualitätsanspruch gewährleistet. Neben den oben beschriebenen notwendigen Infrastrukturausbauten auf diesen Linien ist auch beim Rollmaterial ein erhöhter Standard vorgesehen. Die neuen Doppelgelenktrolleybusse bieten diesen Komfort, weisen sie bezüglich Kapazität rund 50% mehr auf als die herkömmlichen Gelenktrolleybusse. Die Fahrt auf den drei grossen RBus-Linien durch das Zentrum soll für die Kundinnen und Kunden angenehm und komfortabel sein.

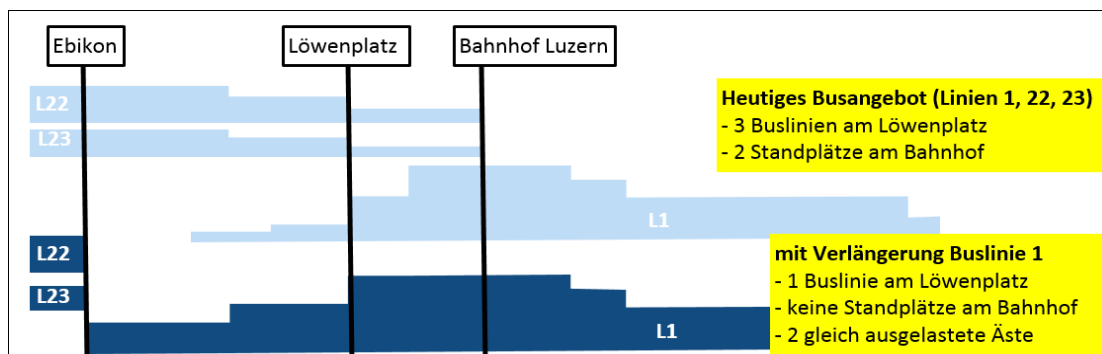
vbl investiert hierzu in die neuen Fahrzeuge, d.h. diese sind mit Komfortsitzen, Klimaanlage und einem Infotainment ausgerüstet. Ein Batteriebetrieb auf einem Abschnitt bedeutet hingegen, dass die entsprechenden Komfortfunktionen nicht mehr betrieben werden könnten und die Busse mit eingeschränkter Geschwindigkeit unterwegs sein würden. Dies bedeutet für den Betrieb (langsamere und längere Umläufe) und die Kunden (Einschränkung bezüglich Komfort) eine deutliche Qualitätseinbusse. Zudem wäre der Betrieb auf dieser Linie nicht mehr zuverlässig gewährleistet.

3.2 Linienverlängerung versus Linientrennung

Der Vorteil der Verlängerung der Linie 1 von Maihof bis Ebikon liegt darin, dass die Überlagerung der Linien 1, 22 und 23 zwischen Bahnhof Luzern und Maihof aufgehoben werden kann. Die Linie 1 weist zwischen Luzern Bahnhof und Maihof geringe Frequenzen auf, während die beiden Linien 22 und 23 auf diesem Abschnitt sehr hohe Frequenzzahlen aufweisen. Auf den beiden Dieselbuslinien 22 und 23 fahren allerdings nicht alle Kunden bis zur Endhaltestelle Bahnhof, sondern steigen vorher (z.B. Löwenplatz oder Schwanenplatz) aus. Zudem müsste der Takt auf diesen beiden Linien zumindest in den Hauptverkehrszeiten ausgebaut werden.

Betriebliche Verbesserung der Linie 1 mit der Trolleybusverlängerung Rontal

- Gleich starke Linienäste werden miteinander verbunden, um ein gleichmässiges Angebot zu erhalten: Ebikon passt vom Fahrgastaufkommen ideal zum Ast Kriens.
- Das Busangebot soll nicht weiter verdichtet werden, sondern es sollen grössere Fahrzeuge eingesetzt werden (Doppelgelenktrolleybusse/RBus) und neue Direktfahrmöglichkeiten angeboten werden.
- Parallelführungen im Zentrum sollen möglichst verhindert werden, damit sich aufgrund einer zu hohen Anzahl Busse die öV-Fahrzeuge nicht selber behindern (z.B. rund um den Bahnhof).



Übersicht betriebliche Verbesserung Linie 1

Im Endzustand verkehrt nur noch eine Buslinie im Abschnitt. Zudem fallen zwei betrieblich ungünstige Standplätze auf dem überlasteten Bahnhofplatz weg.

Es ist keine Option, mit den beiden Linien 22 und 23 oder einer alternativen Buslinie von Ebikon her kommend bei der Stadtgrenze (Maihof) zu wenden, so dass die rund 3 Mio. Fahrgäste dort auf die Trolleybuslinie 1 umsteigen müssten. Die Akzeptanz für einen Umsteigezwang so kurz vor dem Ziel (Stadtmitte) ist nicht gegeben. Die Nachfrage im Rontal würde auf einen Schlag massiv reduziert.

4 Traktionssystemlösungen mit Infrastruktur

Um die elektrisch betriebenen öV-Fahrzeuge mit elektrischer Energie zu versorgen, ist eine Infrastruktur notwendig, welche die Anforderungen des Betriebs- und der Fahrzeuge erfüllt. Es handelt sich dabei immer um ein Gesamtsystem.

Nachfolgend werden verschiedene System-Lösungen vorgestellt und evaluiert. Es handelt sich dabei um die kontinuierliche, die punktuelle, die regelmässige und die einmalig tägliche Versorgung der elektrischen öV-Fahrzeuge, (siehe auch [6]):

	<i>Infrastruktur elektrisches Versorgungsnetz</i>	<i>Infrastruktur für öV-Fahrzeugversorgung</i>	<i>Ausrüstung für öV Fahrzeuge</i>
Kontinuierliche Versorgung / durchgehende Fahrleitung	Stromerzeugung und Verteilung	kontinuierliche Versorgung → Fahrleitung	öV-Fahrzeuge mit elektrischer Notfahrt
Partielle Fahrleitung mit EnergyPack	Stromerzeugung und Verteilung	Weitgehend Fahrleitung – Abschnittsweise oder zeitweise fahrleitungsfrei	öV-Fahrzeuge mit elektrischem Energiespeicher und Notfahrt
Regelmässige Nachladung TOSA / Primove	Stromerzeugung und Verteilung Grosse Zuleitungen	punktuelle, regelmässige Versorgung → Ladestationen unterwegs	öV-Fahrzeuge mit grossem elektrischem Energiespeicher
Einmaller Batteriebus	Stromerzeugung und Verteilung Grosse Zuleitungen	einmalige, tägliche Versorgung → grosse Ladestation im Depot	öV-Fahrzeuge mit sehr grossem, schweren elektrischem Energiespeicher

Übersicht über elektrische Traktionslösungen und die erforderliche Infrastruktur

4.1 Kontinuierliche Versorgung / durchgehende Fahrleitung

Die durchgehende Fahrleitungsanlage versorgt die vollelektrischen öV-Fahrzeuge unterbruchsfrei mit elektrischer Energie. Dazu muss der notwendige Fahrdraht (+ Leiter und - Leiter) über dem öV-Trasse installiert werden. Für die Bereitstellung des 600Volt-Gleichstromes ist rund alle 3 km eine Gleichrichterstation notwendig.



Doppelgelenktrolleybusse / RBus, Luzern



Fahrleitung Büttenen, Luzern



Gleichrichterstation Giseli, Luzern

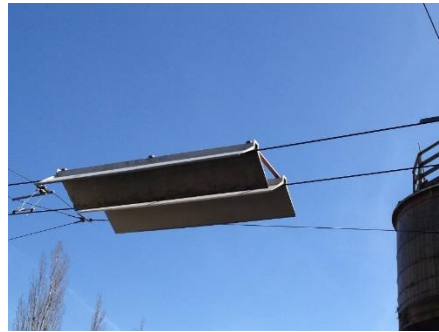
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • erprobt, zuverlässig, sehr lange Lebensdauer • maximale Fahrgastkapazität in öV-Fahrzeug aufgrund minimiertem Fahrzeuggewicht • maximale Energieeffizienz von der Energieerzeugung bis zum Fahrzeug • Energierückgewinnung zwischen Fahrzeugen möglich • lokal emissionsfrei, leise
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • ausserhalb des Fahrtrassees eingeschränkte betriebliche Flexibilität → Notfahrt notwendig • Sichtbarkeit Fahrleitungsanlage • Fahrleitungsanpassungen bei Strassensanierungen
Verbreitung / Reifegrad	<ul style="list-style-type: none"> • weit verbreitet und ausgereift • angewendet für Eisenbahn, Metro, Tram, Trolleybusse
Kennwert Investitionskosten	<ul style="list-style-type: none"> • CHF 2.2 Mio / km Fahrleitungsanlage in beiden Fahrtrichtungen inkl. Gleichrichterstationen
Kennwert Betriebskosten	<ul style="list-style-type: none"> • CHF 50'000.- / km Fahrleitungsanlage in beiden Fahrtrichtungen inkl. Gleichrichterstationen
Beurteilung	wirtschaftlich, verfügbare, erprobte Lösung

4.2 Partielle Fahrleitung mit Energy Pack

Die partielle Fahrleitungsanlage versorgt die vollelektrischen öV-Fahrzeuge abschnittsweise mit elektrischer Energie. Dazu muss der notwendige Fahrdraht (+ Leiter und - Leiter) über dem öV-Trasse installiert werden. Über zu bestimmende Bereiche wird auf die Fahrleitungsanlage verzichtet. Für die Bereitstellung des 600 Volt-Gleichstromes ist rund alle 3 km eine Gleichrichterstation notwendig. Fahrzeugseitig muss zusätzlich ein entsprechender Energiespeicher (z.B. EnergyPack) mitgeführt werden, welcher die elektrische Energie über die fahrleitungsfreie Strecke bereitstellt. Zudem muss die Verbindung zur Fahrleitungsanlage immer wieder getrennt und nach der fahrleitungsfreien Strecke wiederum neu hergestellt werden. Um dies zu bewältigen, sind weitere technische Hilfs-Systeme notwendig. Für den Fahrbetrieb gemäss Fahrplan dürfen keine belastenden Auswirkungen (z.B. zusätzliche Haltezeiten für die Herstellung der elektrischen Verbindung) auftreten. Dies könnte allenfalls bedeuten, dass z.B. ein zusätzliches Fahrzeug zur Haltung des Angebots eingesetzt werden müsste.



Pilotbetrieb partielle Fahrleitung, VBSG



Aufdrahthilfe mit Trichter an Fahrleitung

4.2.1 Einsatzgebiet partielle Fahrleitung

Mit der partiellen Fahrleitung werden zwei Konzepte (Lösungsstrategien) verfolgt, welche unterschiedliche Anforderungen an die Fahrzeugausrüstung stellen. Beiden Konzepten gemeinsam ist, dass ein möglichst zuverlässiges Auf- und Abdrahten möglich sein muss, um eine betriebliche Akzeptanz sowie eine gute Kundenakzeptanz zu erreichen.

Konzept A: Verzicht auf Fahrleitung bei teuren Kreuzungspunkten und/oder bei städtebaulich besonders wertvoll eingeschätzten Zonen.

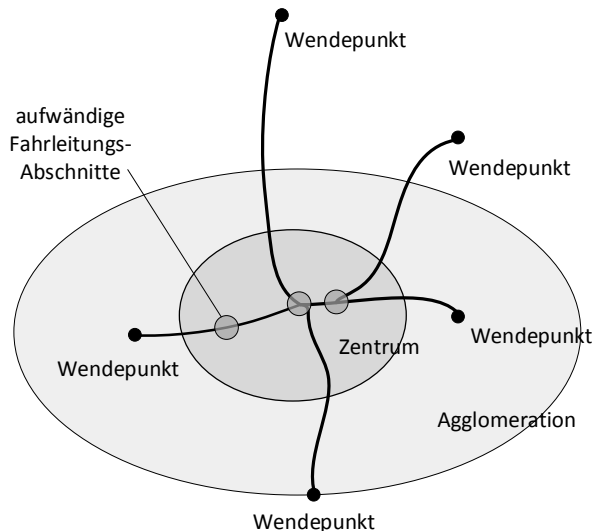


Abbildung: Verzicht auf Fahrleitung in komplexem Fahrleitungsbereich

Die Verkehrsbetriebe St. Gallen (VBSG) haben den Pilotbetrieb, mit Trolleybus und EnergyPack fahrleitungslos über den Bahnhofplatz zu fahren, aufgrund ungenügender betrieblicher Zuverlässigkeit beim Eindrahten an die Fahrleitung abgebrochen. VBSG wird den Bahnhofplatz weiterhin mit einer durchgängigen Fahrleitungsanlage ausrüsten.

Die Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) haben vor, die Trolleybusflotte mit einem EnergyPack auszurüsten und fahrleitungsfrei über den fahrleitungstechnisch komplexen Albisriederplatz zu fahren. Dieser Verkehrsknoten ist umso anspruchsvoller, da Fahrleitungen für Tram sowie für Trolleybus vorhanden sind. Die Resultate über die betriebliche Zuverlässigkeit sind aktuell noch nicht verfügbar.

Konzept B: Örtliche Erweiterung des Trolleybusnetzes ohne Fahrleitungsanlage im neuen Streckenabschnitt.

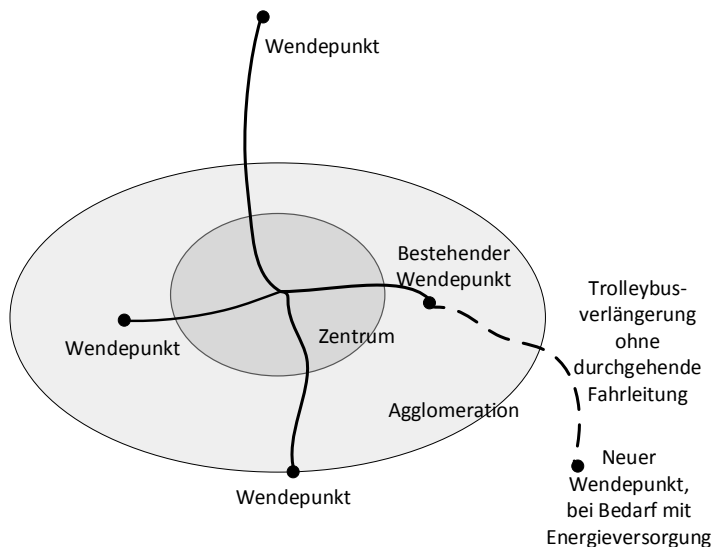


Abbildung: Verzicht auf Fahrleitung für Trolleybusverlängerung in die Agglomeration

Im Bereich der Trolleybusverlängerung muss die notwendige Energie durch eine Batterie im Fahrzeug zuverlässig bereitgestellt werden. Es gilt zu beachten, dass die Zeit für die Nachladung unter dem Fahrdraht drei bis vier Mal länger sein muss, als die Zeit, welche fahrleitungslos zurückgelegt wird (hängt von der Batterie ab). Die Durchgängigkeit mit der bestehenden Systemlösung muss gewährleistet sein. Ein Umsteigen in ein anderes Fahrzeug (aufgrund anderer Technologie) für den Teil der Verlängerung wird von den Fahrgästen nicht akzeptiert.

Ein mit einem bestehenden Trolleybussystem kompatibler Lösungsansatz d.h. EnergyPack ist für eine Strecke von max. 1.5 km im betrieblichen Einsatz bekannt. Abhängig von der Streckenlänge und vom -profil muss am Wendepunkt eine Ladungsinfrastruktur und zusätzliche Ausgleichzeiten vorgesehen werden.

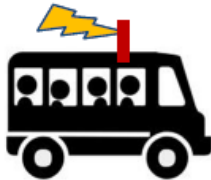
4.2.2 Einsatzgebiet bestehende elektrische Notfahrt / Energy-Pack

Die neun letztbeschafften Doppelgelenktrolleybusse verfügen über eine Traktionsbatterie anstelle des bis anhin eingesetzten Diesel-Notfahrtaggregates. Diese Traktionsbatterie erlaubt es bei Baustellen oder bei Sonderanlässen einen zeitlich und leistungsmässig begrenzten Sonderbetrieb der Fahrzeuge (jedoch ohne Komfortfunktionen für Fahrgäste) —und dies ohne Emissionen und ohne Lärm — sicherzustellen. Beispielsweise konnte am Fastnachtsumzug Kriens im Februar 2015 eine kundenfreundlichere Umleitungsstrecke gewählt und betrieben werden. Weitere befristete Einsätze werden laufend geprüft.

<i>Vorteile</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Elektrische Notfahrt für befristete Betriebsdauer verfügbar • an zu definierenden Stellen (kurze Strecken) könnte auf die Fahrleitung verzichtet werden • lokal emissionsfrei, leise
<i>Nachteile</i>	<ul style="list-style-type: none"> • grösserer elektrischer Energiespeicher mit zusätzlichem Gewicht auf dem Fahrzeug notwendig • geringe Lebensdauer der Batterie bei betrieblichem Einsatz • Verlust an Fahrgastkapazität • Hilfsmittel für automatisches Aufdrahten notwendig • Sichtbarkeit der restlichen Fahrleitungsanlage • Ausserhalb des Fahrtrassees eingeschränkte betriebliche Flexibilität → Notfahrt notwendig • Gesamte Trolleybusflotte müsste nachgerüstet werden
<i>Verbreitung / Reifegrad</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Wird getestet bei VBSG und VBZ • Zuverlässigkeit für automatisches Aufdrahten ist ungenügend • Zeitverlust im Fahrplanbetrieb vorhanden • zusätzliche Betriebskosten
<i>Kennwert Investitionskosten</i>	<ul style="list-style-type: none"> • CHF 2.2 Mio. / km in beiden für restliche Fahrleitungsanlage in beiden Fahrtrichtungen • CHF 60'000.— Mehrkosten / Fahrzeug für Neuaurüstung mit Notfahrtbatterie • CHF 180'000.— Mehrkosten / Fahrzeug für Neuaurüstung mit EnergyPack (eine deutlich grössere Batterie) • CHF 245'000.— / Fahrzeug für Nachrüstung bestehender Fahrzeuge mit EnergyPack • CHF 50'000.— / Fahrzeug für Nachrüstung für automatisches Aufdrahten
<i>Kennwert Betriebskosten</i>	<ul style="list-style-type: none"> • CHF 50'000.- / km Fahrleitungsanlage in beiden Fahrtrichtungen inkl. GL-Stationen • CHF unbekannt / pro Jahr / pro Fahrzeug für Batterieersatz
<i>Beurteilung / Einschätzung</i>	Zuverlässige Lösungen für punktuell fahrleitungsfreie Zonen (kurze Strecken) sind ab Zeitbereich ca. 2020 realistisch.

4.3 Regelmässige stationäre Nachladung der Batterien an Haltestellen (Systeme TOSA & Primove)

Um über längere Strecken komplett auf die Fahrleitung verzichten zu können, muss aufgrund der heute noch ungenügenden Speicherkapazität der Batterien eine regelmässige Nachladung eingerichtet werden. Dies kann mittels Kontaktaufladung erfolgen (siehe Beispiel TOSA Genf).





Skizze: Prinzip stationäre Ladung über Kontakt von oben an der Haltestelle (z. Bsp. System TOSA)



Skizze: Prinzip induktive Ladung über Busplatte an der Haltestelle (System Primove)

Damit die Nachladung an den Haltestellen innerhalb der Aufenthaltszeit durchgeführt werden kann, müssen zusätzliche elektrische Zwischenspeicher installiert werden, da es sehr aufwändig wäre, die notwendige Energiemenge direkt ab dem Versorgungsnetz zu beziehen. Auch mit dem Zwischenspeicher an der Haltestelle müssen versorgungsseitig Anschlussleistung bis zu 400VAC / 100A / 69kVA vorgesehen werden.

<p>Prototyp TOSA Genf an Haltestelle mit Ladeinfrastruktur</p>	
<p>Prototyp TOSA Genf an Haltestelle mit Ladeinfrastruktur</p>	

<p><i>Einbau Ladeinfrastruktur für Primove-System</i></p>	
<p><i>Primove ausgerüsteter Bus an Haltestelle</i></p>	

Die Systemlösung ‚Primove‘ der Firma Bombardier setzt auf eine berührungslose, induktive Aufladung (Transformatorprinzip), deren Ladeinfrastruktur jeweils in der Haltestelle verbaut wird. Nach dem Einbau sind wesentliche Teile der Ladeinfrastruktur im Stadtbild nicht sichtbar, dies ist ein klarer Vorteil dieses Konzeptes. Bombardier hat Tram- und Busprojekte umgesetzt.

Die Systeme TOSA und Primove benötigen ortsfeste Infrastrukturen, welche für den geplanten Einsatz optimiert werden. Fahrzeugbatterien und Ladestationen werden unter Berücksichtigung der vorliegenden Strecken- und Linienparameter optimiert. (Haltestellenabstände, Steigungen, Fahrzeugaufenthalt an Haltestellen).

Im Betrieb beider beschriebenen Konzepte (TOSA und Primove) ist es äusserst wichtig, dass die Fahrzeuge punktgenau an der ortsfesten Ladestation stehen. Nachträgliche Änderungen (Verschiebungen etc.) an diesen Infrastrukturen verlangen bauliche Massnahmen. Schon eine geringe Verschiebung einer Haltestelle bringt erhebliche Aufwände mit sich.

<p><i>Vorteile</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • fahrleitungsfrei • lokal emissionsfrei, leise
<p><i>Nachteile</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • erhöhte Anschlussleistungen seitens der elektrischen Energieversorgung notwendig • teilweise Zwischenspeicher für Energiepufferung notwendig • Verschlechterung des Wirkungsgrades aufgrund Energiezwischenlagerung • wenig flexible Infrastruktur für Zwischenladung (Verschiebungen nur mit Infrastrukturanpassungen) • Herstellerabhängigkeit, kein Infrastrukturstandard verfügbar
<p><i>Verbreitung / Reifegrad</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Diverse, subventionierte Pilotprojekte (TOSA: momentan nur ein Fahrzeug in Genf) • Zugangssicherung zu Zwischenladung notwendig → Busspur von Vorteil zur sicheren Erreichung Ladestation

<i>Kennwert Investitionskosten</i>	<ul style="list-style-type: none"> Fahrzeugkosten ca. identisch wie Trolleybus (Gelenktrolleybus ca. 1.2 Mio CHF, Doppelgelenktrolleybusse ca. 1.5 Mio CHF) ca. 0.6 Mio CHF pro Ladestation als gemittelter Wert (es braucht verschiedene Typen von Ladestationen)
<i>Kennwert Betriebskosten</i>	<ul style="list-style-type: none"> CHF unbekannt
<i>Beurteilung</i>	<p>Noch nicht tauglich, Ergebnisse von Betriebsversuchsprojekten abwarten. Systemlösung über gesamte bestehende Fahrzeugflotte und bestehendes Fahrleitungsnetz ist unrealistisch.</p> <p>Eine Standardisierung (Normierung) der Schnittstellen zwischen Infrastruktur und Fahrzeug ist für einen funktionierenden Markt und eine Investitionssicherheit der Betreiber notwendig.</p>

4.4 Einmallader Batteriebusse

Das Interesse an vollelektrischen Bussen ist seit einigen Jahren bei den Verkehrsbetrieben in der Schweiz und im benachbarten Ausland vorhanden. Insbesondere die emissionsfreie und leise Fahrt sind wichtige Argumente, besonders bei Quartierserschliessungen. Der Grund, weshalb der Einmallader als Elektrobus sich noch nicht durchgesetzt hat, sind die nicht ausreichende Batterieladung für die erforderlichen Tageskilometer, der höhere Beschaffungspreis der Fahrzeuge sowie die fehlende Erfahrung mit Lebensdauer und Kosten der Batterien.



Batteriebus im Oktober 2012 in Luzern

<i>Vorteile</i>	<ul style="list-style-type: none"> Lokal emissionslos, leise Keine elektrische Infrastruktur im Streckenbereich
<i>Nachteile</i>	<ul style="list-style-type: none"> grosse, schwere Batterie → reduzierte Fahrgastkapazität grosse Batterie → hohe Kosten bei Fahrzeugbeschaffung und Batterieersatz eingeschränkte Reichweite → eingeschränkter Einsatz (grösste Kapazität 300 kWh des Herstellers BYD in China) Kühl- und Heizbetrieb senkt Reichweite deutlich Erhebliche Ladeinfrastruktur im Depot notwendig. Beim Betrieb von zahlreichen Fahrzeugen pro Betriebshof steigen die Anforderungen an die elektrische Energieversorgung vor Ort massiv.

<i>Verbreitung / Reifegrad</i>	<ul style="list-style-type: none"> • in Europa Testbetriebe – in China stehen demgegenüber ca. 3000 Elektrobusse im Einsatz • für Doppelgelenktrolleybusse /RBus nicht verfügbar – erste Gelenkbusse mit Batterieantrieb sind in Entwicklung. • Fahrzeuge von Nischenlieferanten – von den namhaften europäischen Anbietern nicht aufgegriffen.
<i>Kennwert Investitionskosten</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Fahrzeugkosten: CHF 400'000.— bis 700'000.— (12m-Bus), je nach Batterieausführung etc. • Infrastrukturkosten: Geschätzt CHF 150'000.— bis 600'000.— für Ladestation je nach Leistung, System und Standort.
<i>Kennwert Betriebskosten</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Unterhaltskosten identisch wie andere Konzepte • Kosten für elektrische Energie allgemein geringer als Diesel (z. Bsp. 0.4 l Diesel pro km → CHF 0.40/km vs. 2 kWh elektrische Energie pro km → CHF 0.30/km)
<i>Beurteilung</i>	betrieblich realistisch und zweckmässig im Kleinbus-QuartierRBus-Bereich

4.5 Vergleich elektrische Ausrüstungsvarianten für Doppelgelenktrolleybusse / RBus

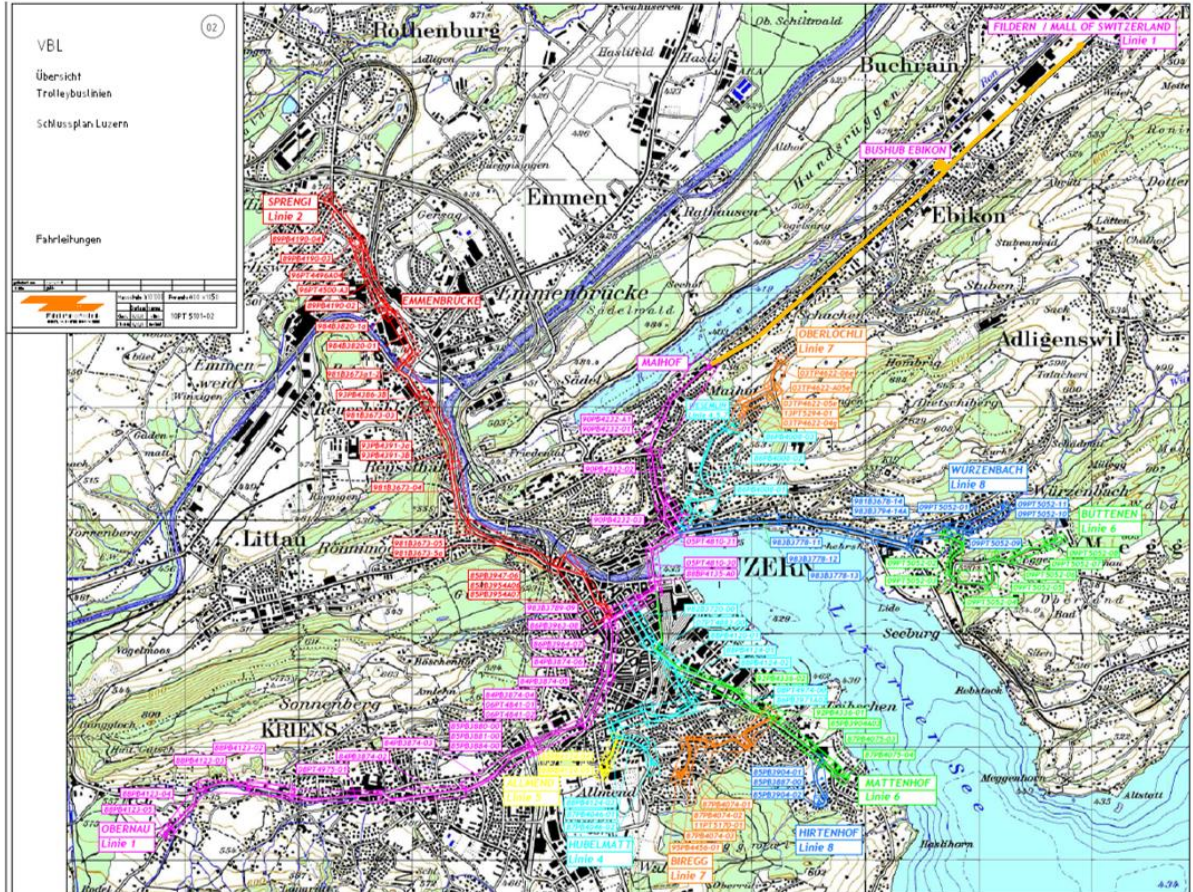
Für die aktuell verfügbaren Batterieausrüstungsvarianten für Doppelgelenktrolleybusse sind die Eckdaten nachfolgend angegeben. Dies gibt den Stand der Entwicklung der einsatzfähigen Traktionsbatterien wieder, welche auch in anderen elektrisch angetriebenen Fahrzeugen verwendet werden.

Fahrleitung durchgehend BISHER	Fahrleitung durchgehend HEUTE	Batterie AUSBAUVARIANTE 1	Batterie AUSBAUVARIANTE 2 nicht verfügbar
Doppelgelenktrolleybusse mit Diesel-Notfahrt	Doppelgelenktrolleybusse mit elektrischer Notfahrt	Doppelgelenktrolleybusse mit elektrischer Fahrt	Doppelgelenktrolleybusse mit elektrischer Fahrt
--	Batteriekapazität 27 kWh	Batteriekapazität 30 kWh	Batteriekapazität 60 kWh
--	Batterie-Technologie: Lithium Iron Phosphate LiFePO4 Optimiert auf Energiemenge mit geringem Gewicht	Batterie-Technologie: Li-titanate (LTO) Li4Ti5O12 Optimiert auf hohe Lade- und Entladeleistungen	Batterie-Technologie: Li-titanate (LTO) Li4Ti5O12 Optimiert auf hohe Lade- und Entladeleistungen
Fahrleistung 50 kW	Fahrleistung 90 kW	Fahrleistung 180 kW Spitzenleistung 100 kW Dauerleistung	Fahrleistung 300 kW Spitzenleistung 200 kW Dauerleistung
Entladeleistung Batterie	Entladerate ca. 3 C	Entladerate ca. 4 C	Entladerate ca. 4 C
Ladeleistung Batterie	Laderate ca. 1C	Laderate ca. 3 C	Laderate ca. 3 C
Streckenverhältnis und Aufenthaltszeit (Anteil ohne Fahrleitung zu Anteil mit Fahrleitung)	ca. 1:4 (4 Teile mit Fahrleitung, 1 Teil ohne Fahrleitung)	ca. 1:3 (3 Teile mit Fahrleitung, 1 Teil ohne Fahrleitung)	ca. 1:2 (2 Teile mit Fahrleitung, 1 Teil ohne Fahrleitung)
Lebensdauer Batterie	1'000 – 2'000 Batteriezyklen abhängig von Entladetiefe und Temperatur	10'000 – 20'000 Batteriezyklen abhängig von Entladetiefe und Temperatur	10'000 – 20'000 Batteriezyklen abhängig von Entladetiefe und Temperatur
Basisvariante	Gewichtsneutral zu Dieselmotor mit Generator (Batteriecontainer ca. 600 kg)	Mehrgewicht ca. 250 kg (Batteriecontainer ca. 850 kg)	Mehrgewicht ca. 900 kg (Batteriecontainer ca. 1500 kg)
Reichweite begrenzt durch Dieseltankinhalt, betrieblich keine Einschränkungen	Notfahrt leer in Sonderfällen bis ca. 12 km, keine H/AC Kleine Abschnitte täglich möglich	Notfahrt leer in Sonderfällen bis ca. 15 km, reduzierte H/AC 3.0 km Gesamtstrecke (1.5 km hin, 1.5 km zurück) betrieblich im flachen Rontal ohne Fahrleitung <u>Überschreitung empfohlene Reichweite: Verkürzung Lebensdauer Batterie</u>	Notfahrt leer in Sonderfällen bis ca. 30 km 6.0 km Gesamtstrecke (3 km hin, 3 km zurück) betrieblich im flachen Rontal ohne Fahrleitung, volle H/AC <u>Überschreitung empfohlene Reichweite: Verkürzung Lebensdauer Batterie</u>
Komfortfunktionen im Bus Heizung und Kühlung (H/AC)	Volle Komfortfunktion unter Fahrleitung eingeschränkte Funktion bei Notfahrt	Komfortfunktionen bei Batteriefahrt eingeschränkt wegen Reichweite	Komfortfunktionen bei Batteriefahrt eingeschränkt wegen Reichweite
Bisherige Basisvariante = Referenzpreis für Vergleich	Mehrkosten zu Dieselmotor mit Generator ca. CHF 60'000.— (heutige und künftige Basisvariante für Trolleybusse)	Mehrkosten zu Dieselmotor mit Generator ca. CHF 180'000.— (bei Neuausrüstung) 245'000 bei Umrüstung der 1ER-Doppelgelenktrolleybusse	<u>In bestehenden Doppelgelenktrolleybusse-Konzept nicht abzubilden → nicht verfügbar.</u> <u>Mehrpreis Batterie zu Ausbaubariante 1 (gemäss HESS): CHF 85'000.—</u>
Lebensdauer = Fahrzeuglebensdauer (20 Jahre)	Prognostizierte Lebensdauer der Batterie (einsatzabhängig) 5 bis 8 Jahre	Prognostizierte Lebensdauer der Batterie (einsatzabhängig) bis 8 Jahre	Prognostizierte Lebensdauer der Batterie (einsatzabhängig) bis 8 Jahre
--	Batteriewechselkosten in 5 - bis 8 Jahren: ca. CHF 55'000.-	Batteriewechselkosten geschätzt von HESS ca. CHF 70'000.—	Batteriewechselkosten geschätzt von HESS: ca. CHF 140'000.— ca. CHF 70'000.—
geforderte Abgaswerte (Abgasnachbehandlung) nicht mehr zuverlässig umsetzbar	--	--	--

Tabellle: Batterieausrüstungsvarianten

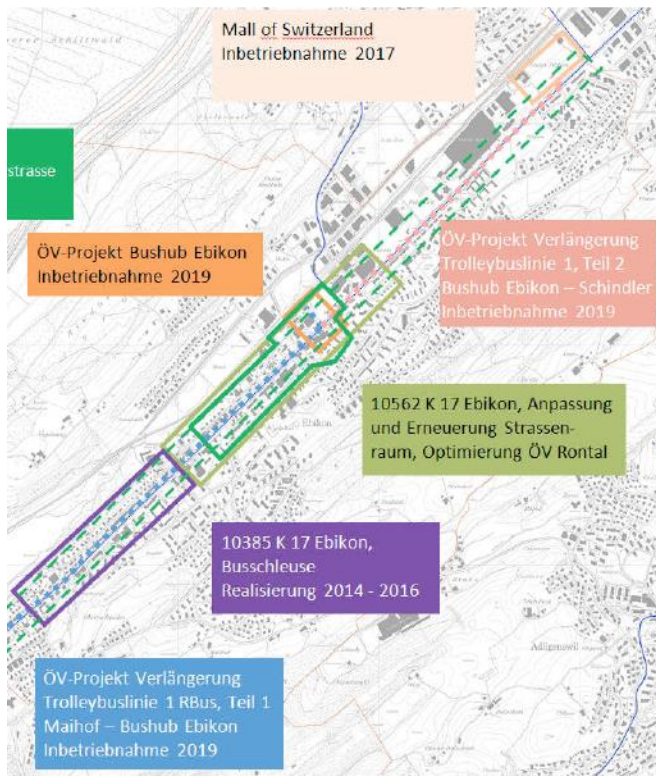
5 Trolleybusverlängerung Rontal konkret

Die Trolleybusverlängerung Rontal soll vom Maihof Luzern, über Bushof Ebikon bis zur Mall of Switzerland realisiert werden.



Übersicht Trolleybusnetz mit Trolleybusverlängerung Rontal

Die bestehende Linie 1 von Obernau über den Bahnhof bis zum Maihof misst knapp 8 km. Mit der Trolleybusverlängerung Rontal wird die Linie 1 um gegen 5 km (inkl. Bushof Ebikon) d.h. um 62% verlängert.



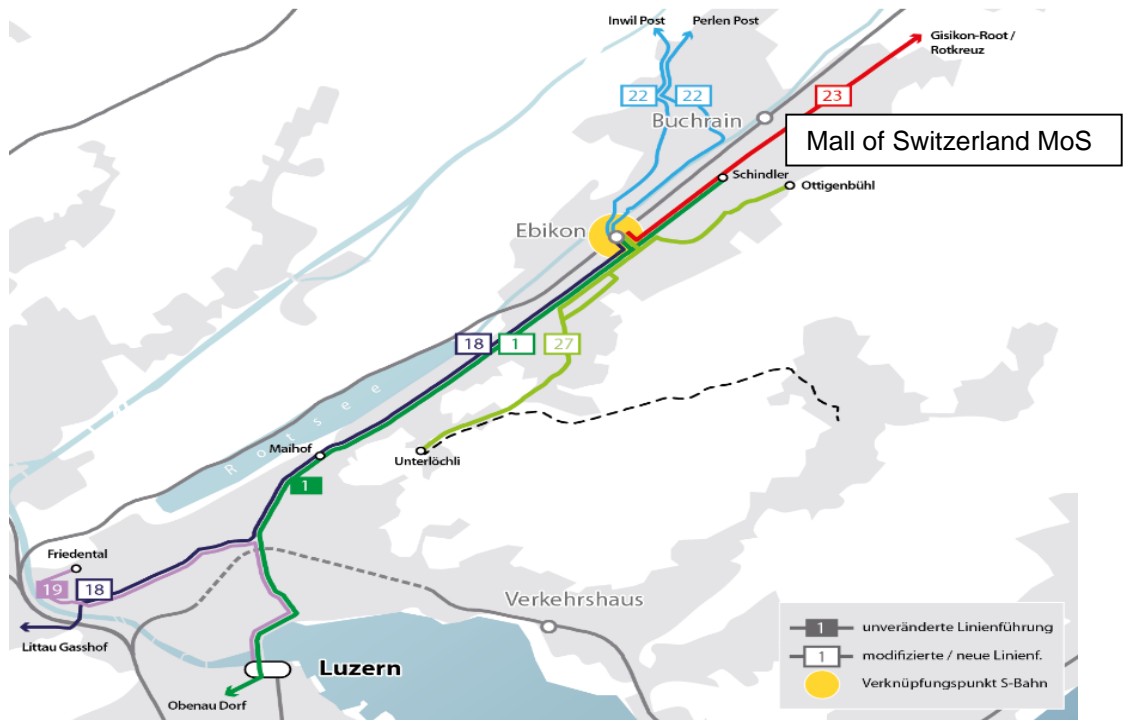
Projektübersicht Trolleybusverlängerung Rontal vif 22.5.2015

Die Planung der *Trolleybusverlängerung Rontal* erfolgt unter der Federführung des vif und wird mit verschiedenen Teil-Projekten (Strassenbau K17 durch vif, Bushof Ebikon durch die Gemeinde Ebikon, Mall of Switzerland durch deren Bauherrschaft und die Fahrleitungsanlagen durch die vbl AG) umgesetzt.

5.1 Netz und Angebot

Die Trolleybuslinie 1 verkehrt künftig zwischen Obernau-Kriens-Luzern Bahnhof-Ebikon bis Mall of Switzerland durchgehend im 7,5 Min.-Takt und mit grossen Doppelgelenkbussen. Von den Aussengemeinden der Agglomeration (Gisikon, Dierikon, Buchrain, Inwil, Eschenbach) verkehren Zubringerlinien bis zum neuen Bushof Ebikon, wo ein direkter Umstieg auf die S-Bahn Richtung Zug und Luzern (Halbstundentakt) und auf die Trolleybuslinie 1 (7,5 Min.-Takt) besteht. Zudem verkehrt ab Ebikon die neue Tangentiallinie 18 via Kantonsspital (grösster Arbeitgeber in der Region) nach Luzern Nord.

Auf dem Abschnitt ab Stadtgrenze sind hierfür eine neue Fahrleitung sowie zwei Gleichrichterstationen notwendig. Zudem ist der neue Bushof in Ebikon zu realisieren. Alle diese Infrastrukturelemente wurden im Rahmen des Angebotskonzepts AggloMobil due erarbeitet und schliesslich ins Agglomerationsprogramm 2. Generation aufgenommen. Der Bund unterstützt die Realisierung dieser Infrastrukturmassnahmen und beteiligt sich voraussichtlich mit 35% an den Kosten.



Übersicht öV Linien im Rontal

5.2 Beurteilung der Realisierungsmöglichkeiten Linienverlängerung Rontal konkret

	<i>Fahrleitung durchgängig</i>	<i>Partielle Fahrleitung mit EnergyPack</i>	<i>TOSA/Primove</i>
Befund 1 Kompatibilität	kompatibel zu bestehendem System	bestehende Fahrzeugflotte muss komplett mit EnergyPack umgerüstet werden	bestehende Fahrzeugflotte und Energieversorgung müssen komplett auf TOSA/Primove umgerüstet werden
Befund 2 Betriebserfahrung	bekannt	Erfahrung / Risiken und Kosten sind noch nicht genügend bekannt Strecken Maihof – Ebikon sowie Ebikon – Mall of Switzerland übersteigen die heutigen EnergyPack – Möglichkeiten. Es müsste auf Fahrleistung und Fahrtkomfort verzichtet werden	Erfahrung / Risiken und Kosten sind noch nicht bekannt Wenig Flexibilität bei Haltestellenverschiebungen mit integrierter Nachladung
Befund 3 Ausblick / Zukunft	-	für zukünftige Linien Erweiterungen erneut prüfen	Für zukünftige Linien Erweiterungen erneut prüfen

	<i>Fahrleitung durchgängig</i>	<i>Partielle Fahrleitung mit EnergyPack</i>	<i>TOSA/Primove</i>
Fazit	<p>wirtschaftlich, tauglich, zuverlässig, erprobt</p> <p>energieeffiziente elektrische Antriebsart</p> <p>Fahrleitungsanlage sichtbar</p> <p>Nutzung bestehender Infrastruktur und getätigter Investitionen</p>	<p>nicht tauglich für Trolleybusverlängerung Rontal:</p> <p>Strecke beträgt gegen 5 km in einer Richtung → Batterie für diese Streckenlänge ist noch nicht verfügbar. Die Betriebskosten, abhängig von der Batterielebensdauer, sind nicht verfügbar.</p> <p>punktueller Anwendung im Bereich komplexer / teurer Fahrleitungsanlagen (Kreuzungen, Wendemöglichkeiten) werden geprüft</p>	<p>nicht tauglich für Trolleybusverlängerung Rontal:</p> <p>neue isolierte Systemlösung nicht kompatibel mit bestehender Linie 1 → kann aufgrund Umsteigevorgang im Maihof nicht eingeführt werden.</p> <p>Komplette Umstellung der Linie 1 → wirtschaftlich nicht tragbar.</p> <p>Investitions- und Betriebskosten sowie Zuverlässigkeit noch nicht bekannt</p> <p>Elektrische Energieversorgung für Haltestellen ist aufwändig</p> <p>Ladeinfrastruktur an Haltestellen sichtbar</p>

5.2.1 Untervariante ohne Fahrleitung von Bushof Ebikon bis Mall of Switzerland (MoS)

Da zum heutigen Zeitpunkt ein EnergyPack für eine Strecke von max. 2 x 1.5 km verfügbar ist, könnte die Ausrüstung der Doppelgelenktrolleybusse/RBusse für eine fahrleitungslose Strecke zwischen Bushof Ebikon und Mall of Switzerland von rund 2 x 2 km in Betracht gezogen werden.

Aufgrund des vorgesehenen Fahrplanes muss je nach Tageszeit mit zusätzlichen Ausgleichszeiten an der Endhaltestelle MoS von bis zu 7½ Minuten gerechnet werden um die Fahrplanstabilität aufrecht zu erhalten. Diese Ausgleichszeit würde die Batterie zusätzlich und über die Kennwerte hinaus belasten und es müsste mit einer massgeblich verminderten Batterielebensdauer gerechnet werden.

Somit kann auch der Abschnitt zwischen Bushof Ebikon und Mall of Switzerland nach heutigem Stand der Technik nicht fahrleitungsfrei betrieben werden.

6 Kostenvergleich elektr. Antriebssysteme

Nach aktuellem Stand der Technik kann kein fundierter Investitions- und Betriebskostenvergleich zwischen dem bekannten Trolleybussystem mit durchgängiger Fahrleitung und der partiellen Fahrleitung mit EnergyPack im öV Bus sowie mit der Systemlösung TOSA/Primove aufgestellt werden. Das notwendige EnergyPack ist für die Trolleybusverlängerung Rontal mit 5 km Streckenlänge für den fahrplanmässigen Einsatz nicht verfügbar.

Die Lösungen mit TOSA / Primove sind nicht betriebserprobt. Somit sind noch keine gesicherten Angaben über Investitions- und Betriebskosten verfügbar.

Nachfolgend ein zusammengefasster Vergleich zwischen durchgängiger Fahrleitung, fahrleitungslosem Abschnitt mit EnergyPack auf den Doppelgelenktrolleybussen/RBussen für die Strecke von rund 2 km zwischen Ebikon Bushof und Mall of Switzerland (für die gesamte Verlängerung von 5 km ist kein EnergyPack verfügbar) und batteriebetriebenen Bussen:

	<i>Machbarkeit</i>	<i>Jährliche Kosten der Investition für Fahrzeug und Infrastruktur:</i>	<i>Jährliche Betriebskosten / Unterhaltskosten für Fahrzeug und Infrastruktur:</i>
Kontinuierliche Versorgung / durchgehende Fahrleitung		100% = bekannte Vergleichsbasis	100% = bekannte Vergleichsbasis
Partielle Fahrleitung mit EnergyPack Ebikon bis MoS Strecke 2 km		90 – 110%	120 – 180%
Regelmässige Nachladung TOSA / Primove		Hoher Investitionsbedarf bei Systemwechsel	unbekannt
Einmallader Batteriebus			

Übersicht Machbarkeit mit indikativem Kostenvergleich

Rot: nicht verfügbar resp. wesentlich höhere Kosten

Orange: verfügbar mit Einschränkungen, fehlende Betriebserfahrung, höhere Kosten

Grün: zuverlässig, erprobt, bekannte Kosten

7 Literaturübersicht

- [1] VVL Trolleybusstrategie 12. Februar 2013
- [2] Infras Bus der Zukunft-Endbericht 24.Sep.2014
- [3] öV-Bericht_2014-2017_B93_12Nov13
- [4] Regierungsratsbeschluss vom 17.3.2015
- [5] http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion
- [6] Eisenbahn Revue 07/2015: Stand und Perspektiven elektrischer Busantriebe
Prof. Dr. Ulrich Weidmann, ETHZ

8 Präsentationen aus e-bus Fachgruppen

- {1} e-bus Konferenz Hamburg 17. - 18.11.2014
<http://www.trolleymotion.eu/www/index.php?id=75>
- {2} Infotagung Bussysteme 17.02.2015
http://www.bfe.admin.ch/energie/00588/00591/index.html?lang=en&dossier_id=06289
- {3} Studie HSLU für BHLS (Busses with High Level of Service)
http://www.RBus.ch/index.php/download_file/view/904/337/166/

9 Anhänge

Anhang 1- Eckdaten Batterie-Technologien

Lithium Iron Phosphate: LiFePO₄ cathode, graphite anode Short form: LFP or Li-phosphate - Since 1996	
Voltage, nominal	3.20 V, 3.30 V
Specific energy (capacity)	90–120 Wh/kg
Charge (C-rate)	1C typical, charges to 3.65 V; 3h charge time
Discharge (C-rate)	1C recommended; 20–25 C continuous; 40 A pulse (2s); 2.50 V cut-off (lower than 2 V causes damage)
Cycle life	1'000 – 2'000 (related to depth of discharge, temperature)
Thermal runaway	270°C (518°F) Very safe battery even if fully charged
Applications	Portable and stationary needing high load currents and endurance
Comments	Very flat voltage discharge curve but low capacity. One of safest Li-Ions. Used for special markets. Elevated self-discharge.


Lithium Titanate: Graphite cathode; Li₄Ti₅O₁₂ (titanate) Short form: LTO or Li-titanate - Since 2008	
Voltage, nominal	2.40 V
Specific energy (capacity)	70 – 80 Wh/kg
Charge (C-rate)	1 C typical; 5 C maximum, charges to 2.85 V
Discharge (C-rate)	10 C continuous, 30 C 5s pulse; 1.80 V cut-off on LCO/LTO
Cycle life	3,000–7,000
Thermal runaway	One of safest Li-ion batteries
Applications	UPS, electric powertrain (Mitsubishi i-MiEV, Honda Fit EV)
Comments	Long life, fast charge, wide temperature range but low specific energy and expensive. Among safest Li-ion batteries.

Quelle: batteryuniversity.com
 Siehe auch [5].

Anhang 2 – Ladekonzepte Batterieelektrische Busse

Abbildung 15: Ladekonzepte für batterieelektrische Busse

Am Beispiel eines 12m-Busses



	Laden auf der Strecke	Laden an der Endhaltestelle	Einmallader	Batterie-wechsel
Zyklen pro Tag	150 – 250	5 – 20	1	3 – 8
Batteriekapazität	5 – 10 kWh	50 – 100 kWh	200 – 400 kWh	50 – 200 kWh
Entladerate	~ 15 C	~ 2 C	< 0,5 C	~ 1 C
Laderate	~ 50 C	~ 5 - 10 C	< 0,2 C	Abhängig von Frequentierung
	Schnelllader		Standardlader	

Anmerkung: 2C bedeutet, dass die Batterie mit einer Leistung, die 2x ihren Nominal-Wert aufweist, geladen oder entladen werden kann.

Quelle: Sauer 20136

Abkürzungsverzeichnis: (falls Abkürzungen im Bericht verwendet werden)

(ansonsten dürfen den Kantonsräten keine Abkürzungen zugemutet werden, die sie schlicht nicht kennen!)

- GT = Gelenktrolleybus
- DGT = Doppelgelenktrolleybusse
- MoS = Mall of Switzerland
- TBVR = Trolleybusverlängerung Rontal