

Bachelorarbeit

Systemanalyse akkubetriebener Trolleybusse mit Streckenladung

Stefan Moshhammer

e11802570@student.tuwien.ac.at

Matr.Nr. 11802570

Datum: 26. März 2022

Kurzfassung

Das Thema des Umweltschutzes und der Dekarbonisierung erlangt von Tag zu Tag eine größere Bedeutung. Um die Erderwärmung einzuschränken ist ein Umdenken in vielen Lebensbereichen notwendig. Da speziell der motorisierte Individualverkehr maßgeblich zu den Emissionen beiträgt, spielt die Mobilität der Menschen eine wichtige Rolle. Schon seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts stellt der Oberleitungsbus im urbanen Raum einen wichtigen Bestandteil des öffentlichen Verkehrsnetzes dar. Mit den elektrisch betriebenen Oberleitungsbussen ist es möglich, den CO₂-Ausstoß im Betrieb, im Vergleich zu Dieseln, durch die Bereitstellung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen zu minimieren. Heute gibt es bereits zahlreiche Weiterentwicklungen des Systems, die es ermöglichen, die erforderlichen Oberleitungen weitestgehend zu reduzieren und die Abschnitte ohne Oberleitungen mit Hilfe von Akkus zu überbrücken. Dadurch können zum Beispiel bestehende Buslinien mit wenig Aufwand und geringem Materialverbrauch möglichst platzsparend und emissionsarm verlängert werden. Der geringere Anteil an Fahrdrähten entlang der Strecken verhilft, den Arbeitsaufwand für die Herstellung und Instandhaltung zu begrenzen. Das Ziel der Arbeit ist es, einen detaillierten Überblick über das System von akkubetriebenen Trolleybussen zu verschaffen. Zusätzlich gilt es die Anwendungsgrenzen auszuloten sowie einen potenziellen Einsatz im bestehenden Busnetz von Linz zu evaluieren.

Inhaltsverzeichnis

1	Oberleitungsbusse im Überblick	3
1.1	Oberleitungsbusse	3
1.1.1	Begriffsdefinition und Systemüberblick	3
1.1.2	Vor- und Nachteile von Oberleitungsbusen	4
1.2	Rechtliche Grundlage (in Österreich)	6
1.3	Historische Entwicklung	7
1.4	Akkubetriebene Trolleybusse mit Streckenladung	8
1.4.1	Begriffsdefinition und Systemüberblick akkubetriebener Trolleybusse	8
1.4.2	Vor- und Nachteile von akkubetriebenen Trolleybusse	11
2	Akkubetriebene Trolleybusse rund um die Welt	14
2.1	eObus am Beispiel von Salzburg	14
2.2	International	16
3	Technische Hintergründe akkubetriebener Trolleybusse	16
3.1	Elektrisches Netzwerk	16
3.2	Antrieb und Verbrauch	18
3.2.1	Mögliche Reichweite von Linienverlängerungen	20
3.3	Energiespeicher	21
3.3.1	Akkutechnologien im Überblick	21
3.3.2	Lebensdauer von Akkus	25
3.4	Ladetechnik	26
3.5	Ladestrategien und Einfluss auf den Betrieb	28
4	Anwendung auf das Busnetz in Linz	30
5	Schlussfolgerung	34
	Anhang	43

1 Oberleitungsbusse im Überblick

1.1 Oberleitungsbusse

1.1.1 Begriffsdefinition und Systemüberblick

Oberleitungsbusse werden weltweit unter verschiedenen Begriffen in öffentlichen Verkehrsnetzen eingesetzt. Zu den gängigsten Bezeichnungen zählen: Omnibus, Oberleitungsomnibus, Obus, O-Bus, Trolleybus, Trolley, Filobus und gleislose Bahn [53]. In Österreich und Deutschland hat sich die Bezeichnung Obus durchgesetzt während zum Beispiel in der Schweiz sowie international die Begriffe Trolley oder Trolleybus üblich sind [16]. Das Wort „Trolley“ kommt aus dem Englischen und bezog sich auf den vierrädigen Kontaktwagen, der auf der Oberleitung für die Stromabnahme mitgeführt wurde. Heutzutage erfolgt die Stromabnahme mit Schleifschuhen an der Unterseite der Fahrdrähte, da der Kontaktwagen die Neigung hatte zu entgleisen [38].

Das System der Obusse bedarf, im Vergleich zu einem Stadtlinienbus¹, eines Netzwerkes aus Oberleitungen, das aus zweipoligen Fahrdrähten pro Fahrtrichtung besteht, um die Fahrzeuge mit Strom zu versorgen und um eine Rückleitung zu ermöglichen [91, S. 206]. Bei spurgeführten Verkehrsmittel, wie zum Beispiel Zügen, ist ein einpoliger Fahrdrabt ausreichend, da die Schiene als Stromrückleitung dient. Durch die Gummibereifung ist das Fahrgestell vom Boden isoliert und muss über zwei einpolige Stangenstromabnehmer oder einen Doppelstromabnehmer mit Strom versorgt werden. Außerdem ist die Isolierung des Fahrgestells von den gesamten elektrischen Einrichtungen eine Grundvoraussetzung für einen sicheren Betrieb, da auch hier die Erdung über eine Schiene fehlt [20, S. 247].

Vereinfacht ausgedrückt wird der Strom aus den Leitungen mit einem flexiblen Stromabnehmer abgenommen und zu den Elektromotoren geleitet, die das Fahrzeug antreiben. In Abbildung 3 ist eine Systemskizze eines Standard-Oberleitungsbusse ersichtlich. Um den Betrieb unabhängig von den Leitungen zu gewährleisten, werden auch Hilfs-Dieselmotoren oder Hilfs-Akkus eingesetzt. Dadurch kann das Fahrzeug auch kurze Strecken, zum Beispiel in die Werkstatt oder Garage, ohne eine Oberleitung zurücklegen. Für den täglichen Betrieb ist die Stromleitung aber unbedingt erforderlich.

Der Obus mit Hilf-Antrieb bzw. Hilf-Akkus ist nicht mit dem sogenannten Duo-Bus zu verwechseln, der mit einem vollwertigen Verbrennungsmotor längere Strecken ohne Oberleitung zurücklegt [20, S. 247]. In Abbildung 1 ist ein moderner Obus der Firma Van Hool mit einer



Abb. 1: Van Hool Exqui.City 24 T Doppelgelenk-Trolleybus im Einsatz in Linz
Quelle: [39]

Länge von 24 m zu sehen. Dieses Modell ist momentan in Linz mit 20 Stück vertreten. Mit diesen Doppelgelenkbussen können bis zu 183 Personen (55 Sitzplätze + 127 Stehplätze + 1 Fahrer)

¹Meist ein mit Verbrennungsmotor angetriebener Autobus [53].

transportiert werden [15]. In Abbildung 2 ist die Seitenansicht des Fahrzeugs (ohne Oberleitung) dargestellt. Es ist zusätzlich ein Traktionsakku mit einer Kapazität von 20 kWh verbaut (laut Datenblatt [42]). Allerdings ist der Bus lediglich für kurze Strecken ohne Infrastruktur geeignet. Wie sich in den späteren Berechnungen zeigen wird, wären in Kombination mit der Technologie der Streckenladung tatsächlich Linienverlängerungen möglich.



Abb. 2: Van Hool Exqui.City 24 T Doppelgelenk-Trolleybus Seitenansicht
Quelle: [88]

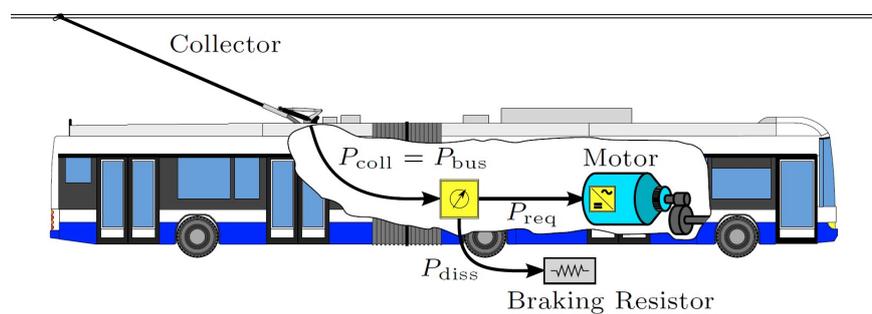


Abb. 3: Systemskizze eines regulären Oberleitungsbusses
Quelle: [55]

1.1.2 Vor- und Nachteile von Oberleitungsbussen

Das System der Oberleitungsbusse zeichnet sich durch die Bindung an die Oberleitung aus. Im Vergleich zu den spurgeführten Verkehrsmitteln, wie zum Beispiel Straßenbahnen, ermöglicht die Spurbindung eine gewisse Flexibilität in der Fahrt. Einfache Hindernisse können mit Obussen schnell durch einen Spurwechsel umfahren werden. Wie in Abbildung 4 ersichtlich, ist bei dem Modell Skoda 9-Tr quer zur Fahrtrichtung eine Abweichung von 4500 mm abseits der stromführenden Leitungen möglich [91, S. 218]. Straßenbahnen hingegen, müssen warten bis das Hindernis von den Gleisen entfernt wird.

Die Verwendung von Elektromotoren bringt neben der Elimination lokaler Abgasbelastungen im Betrieb eine Vielzahl an weiteren Vorteilen mit sich [89]. Für die Fahrgäste sorgt ein Elektroantrieb, durch eine schnellere und sanftere Beschleunigung, für eine reduzierte Fahrzeit und einen höheren Komfort. Durch die bessere Beschleunigung im Vergleich zu Dieseln, können die Trolleybusse große Steigungen in kurzer Zeit bewältigen [31]. Zusätzlich kann durch Rekuperation die Effizienz gesteigert werden, indem die Bremsenergie wieder in die Oberleitung eingespeist wird [91, S. 206]. Ein nicht unbedeutender Vorteil von Oberleitungsbussen ist, dass der elektrische Antrieb eine Ausführung mit Portalachsen² (vgl. Abbildung 5) erlaubt, wodurch ein durchgängiger Niederfler³-Mittelgang im Sinne der Barrierefreiheit und dem Fahrgastwechsel umgesetzt werden kann [89].

² „Bei Stadtbussen werden „umgekehrte“, Portalachsen eingesetzt: Dies sind Portalachsen, bei denen die Antriebswelle unterhalb der Raddrehachse verlaufen. Auf diese Weise ist es möglich, den Mittelgang des Fahrgastraumes niedrig über der Fahrbahn zu realisieren und dem Fahrgast beim Erklimmen des Busses Stufen zu ersparen [27, S. 41].“

³ „Busse dieses Konzepts haben im Fahrgastraum einen nahezu ebenen Fußboden und einen komfortablen Ein- und Ausstieg. Über eine Stufe von nur 340 mm Höhe kann der Mittelgang betreten werden [50, S. 146].“

Ein Nachteil der Obusse ist, dass die Montage und Wartung der Oberleitung mit einem großen Aufwand verbunden ist [91, S. 206]. Die Vielzahl an Stromleitungen mit den zahlreichen Abspannungen und Luftweichen sind oftmals kaum attraktiv für das Stadtbild. Wie in Unterunterabschnitt 1.1.1 erwähnt, sind manche Fahrzeuge mit einem zusätzlichen Akku oder einem Verbrennungsmotor ausgestattet, um kurze Strecken zu überbrücken. Im Falle eines Hilfs-Verbrennungsmotors, ist mit einem zusätzlichen Wartungsaufwand sowie einem Emissionszuwachs zu rechnen [91, S. 207].

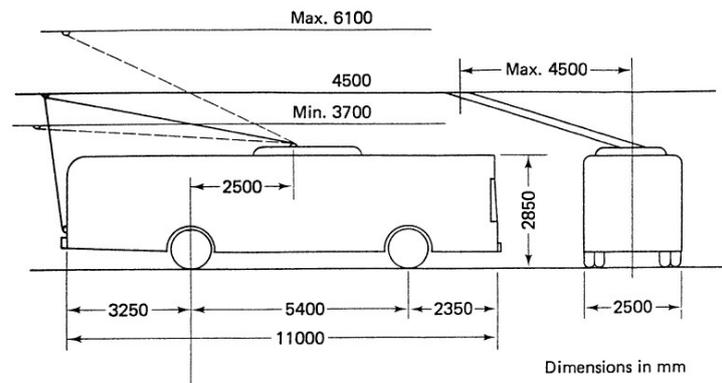


Abb. 4: Abmessungen eines Standard-Oberleitungsbusses sowie Darstellung der Oberleitungen (Skoda 9-Tr)

Quelle: [91, S. 220, Figure 5.6]

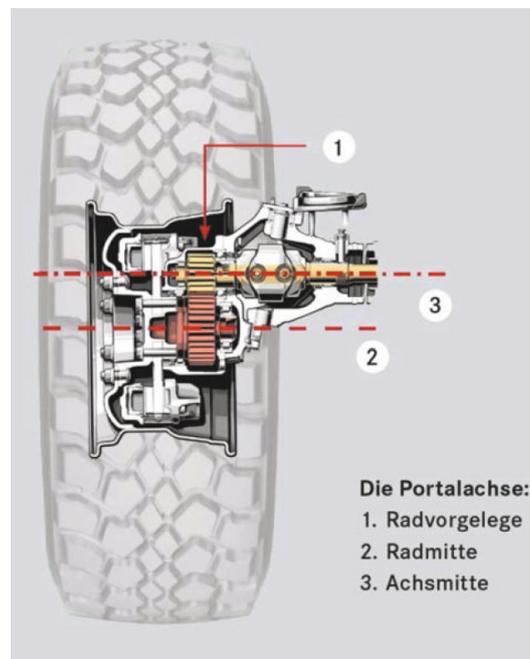


Abb. 5: Portalachse eines Mercedes-Unimogs. Die Antriebswelle liegt bei einer regulären Portalachse oberhalb der Drehachse des Rades um eine höhere Bodenfreiheit zu gewährleisten. Bei Trolleybussen wird eine „umgekehrte“ Portalachse für eine niedrigere Bodenfreiheit verwendet um die Anforderungen an die Barrierefreiheit zu erfüllen.

Quelle: [27, S. 41, Abb. 6.7]

1.2 Rechtliche Grundlage (in Österreich)

Grundsätzlich werden Obusse im Eisenbahngesetz von 1957 mit Straßenbahnen gleichgestellt:

EisbG

„Oberleitungs-Omnibusse gelten als Straßenbahnen, sofern es sich nicht um die Haftung für Schäden beim Betrieb eines Oberleitungs-Kraftfahrzeuges, wenn auch in Verbindung mit ortsfesten eisenbahntechnischen Einrichtungen, handelt [EisbG, §5(3)].“

Da Oberleitungsbusse im Gegensatz zu Straßenbahnen nicht auf Schienen sondern auf Straßen verkehren, ist das Straßenverkehrsrecht mit der Straßenverkehrsordnung und dem Kraftfahrgesetz ebenso zu berücksichtigen. Im Widerspruch zum Eisenbahngesetz werden Oberleitungsbusse nicht mit Schienenfahrzeugen gleichgestellt:

StVO

*„24. Schienenfahrzeug: ein an Gleise gebundenes Fahrbetriebsmittel; ein Oberleitungs-kraftfahrzeug ist jedoch kein Schienenfahrzeug im Sinne dieses Bundesgesetzes;
24a. Oberleitungsomnibus: unbeschadet § 5 Abs. 3 Eisenbahngesetz 1957 und § 39 Abs. 1 Kraftfahrliniengesetz ein Omnibus, der im regionalen Linienverkehr eingesetzt wird und dessen Antriebsenergie Oberleitungen entnommen wird [StVO, §2(1)].“*

KFG

„1. Kraftfahrzeug ein zur Verwendung auf Straßen bestimmtes oder auf Straßen verwendetes Fahrzeug, das durch technisch freigemachte Energie angetrieben wird und nicht an Gleise gebunden ist, auch wenn seine Antriebsenergie Oberleitungen entnommen wird [KFG, §2].“

KFG

„Für Kraftfahrzeuge mit Antrieb durch elektrische Energie, wie Akkumulatoren-Kraftfahrzeuge, Oberleitungskraftfahrzeuge [...], können durch Verordnung nach den Erfordernissen der Verkehrs- und Betriebssicherheit, dem jeweiligen Stand der Technik entsprechend, unter Berücksichtigung ihrer Eigenart Bestimmungen über ihre Bauart, Ausrüstung und Betriebsart, insbesondere im Hinblick auf den Antrieb durch elektrische Energie, erlassen werden [KFG, §89].“

Der § 4 des Kraftfahrgesetzes befasst sich mit den maximalen Fahrzeugabmessungen verschiedener Fahrzeuge. Im Jahr 2014 hat diese Begrenzung in den beiden letzten verbleibenden Städten mit Obus-Linien in Österreich (Salzburg und Linz) für Herausforderungen gesorgt. Für den in Abbildung 1 dargestellten 24 m langen Oberleitungsbus war eine dauerhafte Genehmigung für den Betrieb aufgrund der Überschreitung der Maximallänge von Gelenkbussen von 18,75 m erforderlich [83].

KFG

„§ 4. (6) Die Abmessungen von Kraftfahrzeugen und Anhängern dürfen nicht überschreiten

1. eine größte Höhe von 4 m,
2. eine größte Breite von
 - a) bei klimatisierten Fahrzeugen (§ 2 Abs. 1 Z 44) 2,6 m,
 - b) bei allen anderen Kraftfahrzeugen und Anhängern 2,55 m,
3. eine größte Länge von

- a) bei Kraftfahrzeugen und Anhängern, ausgenommen Sattelanhänger, Omnibusse und Gelenkkraftfahrzeuge 12,00 m,
 - b) bei Gelenkkraftfahrzeugen 18,00 m,
 - c) bei Gelenkbussen 18,75 m,
 - d) bei zweiachsigen Omnibussen 13,50 m
 - e) bei Omnibussen mit mehr als zwei Achsen 15,00 m
- [KFG, §4(6)]. “

Weitere Grundlagen werden in der Straßenbahnverordnung definiert:

StrabVO

„Das Straßenbahnunternehmen darf anderen Unternehmen des Personenverkehrs die Benützung eigener Bahnkörper durch Omnibusse oder Oberleitungs-Omnibusse des Linienverkehrs gestatten. Die Sicherheit und Ordnung des Straßenbahnbetriebes darf hierdurch nicht beeinträchtigt werden [StrabVO, §60(1)]. “

StrabVO

„Als Oberleitungs-Omnibusse gelten ein- oder mehrgliedrige Fahrzeuge einschließlich deren Anhänger, bei denen grundsätzlich die Antriebsenergie von einer Oberleitung bezogen wird, auch wenn diese Fahrzeuge kurze Strecken ohne Antriebsenergie aus der Oberleitung zurücklegen [StrabVO, §63(1)]. “

1.3 Historische Entwicklung

Die ersten Ideen für Oberleitungsbusse vom Industriellen Werner Siemens sind bis in das Jahr 1847 zurückzuführen [62]. Nach den ersten Entwicklungen von Elektromotoren war es naheliegend, dass ein Fahrzeug damit betrieben werden kann. Mit der Idee, die notwendige Stromleitung für die Elektro-Fahrzeuge als Leitungen über der Straße, in sicherem Abstand zu den Menschen zu montieren, wurde die Grundlage für die heutigen Obusse gelegt [23].

Am 29. April 1882 stellt Werner Siemens mit dem „Elektromote“ den weltweit ersten elektrischen Oberleitungsbus vor [62]. In Abbildung 6 sieht man das Fahrzeug samt Oberleitung auf der rund 500 m langen Teststrecke in Berlin.

Eine der ersten Oberleitungsbuslinien wird 1901 im Bielathal (Deutschland), wenn auch nur für 3 Jahre, eröffnet [14]. In den folgenden Jahren werden zahlreiche weitere Linien in Deutschland, Italien, Großbritannien, Dänemark und der Schweiz errichtet [23]. Nachdem sich die Probleme mit dem Stromabnehmer, dem vierrädigen „Trolley“, häuften, wird dieser durch eine „Kontaktstange“ ersetzt. Diese wird im Gegensatz zur vorherigen Konstruktion unter der Oberleitung geführt und verhindert, dass die Oberleitungen eine zu große Belastung erfahren [54, S. 68].

Der Vorteil, dass keine Gleise mit Spurbindung sondern die bereits bestehenden Straßen verwendet werden können, verhilft dem System zu einem raschen internationalen Aufstieg unter anderem in: Griechenland, Brasilien, Mexiko, Spanien, Frankreich, Italien und in der Sowjetunion [91, S.32]. Denn während die Kosten für der Gleisherstellung entfallen, sind die Betriebskosten bis in die 1950er Jahre mit denen einer Straßenbahn zu vergleichen [14].

Bis 1950 erfährt das System trotz der beiden Weltkriege einen Aufschwung. Auf der ganzen Welt werden immer mehr Obusse für den öffentlichen Nahverkehr eingesetzt [54, S.345]. Bald nach dem Zweiten Weltkrieg bremst sich die Entwicklung ein, da der Autobus mit Verbrennungsmotor sowohl flexibler im Betrieb, als auch wirtschaftlicher wird [89]. Besonders in den zersiedelten Gebieten der Städte wird der Dieselbus den Trolleybussen vorgezogen [14]. In Wien wird die letzte Obus-Linie im Jahr 1958 eingestellt und gegen Benzinautobusse ersetzt [17]. Ein Modell aus diesem Zeitraum ist in Abbildung 7 zu sehen.



Abb. 6: Elektromote von Werner Siemens auf der Teststrecke in Berlin

Quelle: [61]



Abb. 7: Obus-Motorwagen W 76.395 in den 50er Jahren

Quelle: [48]

Um 1970 sorgt die Mineralölkrise für ein Umdenken im Nahverkehrsbereich wobei der Oberleitungsbus durch seinen Elektroantrieb immer mehr Interesse weckt [54, S.347]. Der neuerliche Aufschwung zeigt sich in der Sowjetunion deutlich: während 1960 in 58 Städten Obusse verkehrten, sind es 15 Jahre später schon 142 Städte [69]. Bereits damals gibt es Versuche mit den sogenannten „Duo-Bussen“ Teilstrecken ohne Oberleitungen entweder mit Hilfs-Akkus oder mit Hilfs-Verbrennungsmotoren zurückzulegen, um die Kosten der Oberleitungen zu reduzieren [54, S.347].

Um 1980 werden erste Erfolge mit Bleibatterien erzielt (Neoplan Midibus MIC N 8008 E) jedoch ist das Gewicht der Batterien, die Leistungsfähigkeit und Ladezeiten mit Einschränkungen verbunden. In den nächsten Jahren werden zahlreiche Versuche mit ZEBRA-Batterien⁴, NiMH-Batterien⁵, Superkondensatoren sowie Brennstoffzellen durchgeführt [89].

Bis heute stellt das hohe Gewicht der Akkus und die verschiedenen Ladetechniken ein großes Problem für die tägliche Nutzung und den Betrieb dar. Der Elektroantrieb in Kleinwagen kommt aufgrund der geringen Anforderungen und Größe gut mit dem Gewicht der Akkus zurecht. Die Zahl der Neuzulassungen von Elektroautos steigt daher in der heutigen Zeit rasant an [12]. Bei elektrisch betriebenen Bussen ist hingegen eine deutlich größere Akkukapazität von 200 kWh (rund 3 Tonnen) erforderlich⁶ [81].

Die weitere Entwicklung der (akkubetriebenen) Oberleitungsbusse ist infolgedessen maßgeblich vom technischen Fortschritt der Akkus, speziell in der Erhöhung der gravimetrischen Leistungsdichte⁷ und Ladetechnik sowie der Gewichtsreduktion, abhängig [81].

1.4 Akkubetriebene Trolleybusse mit Streckenladung

1.4.1 Begriffsdefinition und Systemüberblick akkubetriebener Trolleybusse

Die Entwicklung der akkubetriebenen Oberleitungsbusse ist weltweit im Gange. Aufgrund der Aktualität des Themas gibt es zum jetzigen Stand noch keine eindeutige, technische oder internationale Definition des Systems. Infolgedessen wird in der vorliegenden Arbeit, der Begriff *akkubetriebener Trolleybus mit Streckenladung* (in Anlehnung an [82]) verwendet und folgendermaßen definiert:

Akkubetriebene Trolleybusse mit Streckenladung

Akkubetriebene Trolleybusse mit Streckenladung können als Weiterentwicklung der Oberleitungsbusse, Elektrobusse und Hybridbusse bzw. Duo-Busse angesehen werden. Der Grundgedanke,

⁴Natrium-Nickelchlorid-Batterie

⁵Nickel-Metallhydrid-Batterie

⁶Im Vergleich dazu benötigt das beliebte Tesla Model 3 in der Standardkonfiguration nur 60 kWh [18].

⁷„Die gravimetrische Leistungsdichte beschreibt, wie viel Leistung pro Masse (Gewicht) aus einer Batterie entnommen werden kann. Sie wird in Watt pro Kilogramm (W/kg) angegeben [40].“

nicht immer auf eine Oberleitung angewiesen zu sein, ist der gleiche der Hybridbusse oder Duo-Busse. Ziel ist es, die Spurbinding, wie sie bei Oberleitungsbussen üblich ist, nicht nur abschnittsweise zu lösen, sondern bestimmte Strecken planmäßig und dauerhaft mit Hilfe von Akkus betreiben zu können. Geladen werden die akkubetriebenen Trolleybusse vorrangig während der Fahrt (Streckenladung = In Motion Charging) und bei Bedarf zusätzlich an Haltestellen (Gelegenheitslader, Opportunity Charging) oder im Depot (Nachtlader, Overnight Charging).

Dieses Konzept ist unter einigen weiteren Begriffen wie zum Beispiel:

- HO-Bus (Hybrid-Oberleitungsbus) [8],
- eObus [57],
- BOB (Batteriebetriebener-Oberleitungs-Bus) [63],
- Hybrid-Obus bzw. Hybrid-Trolleybus⁸ [82] oder
- IMC-Bus bzw. DC-Bus (In-Motion-Charging-Bus bzw. Dynamic-Charging-Bus) [82]

bekannt.

Am anschaulichsten kann das System an Abbildung 8 bis Abbildung 11 erklärt werden. Diese zeigen Ausschnitte des Werbevideos der IMC500⁹ Ladetechnik der Firma Kiepe-Electric.

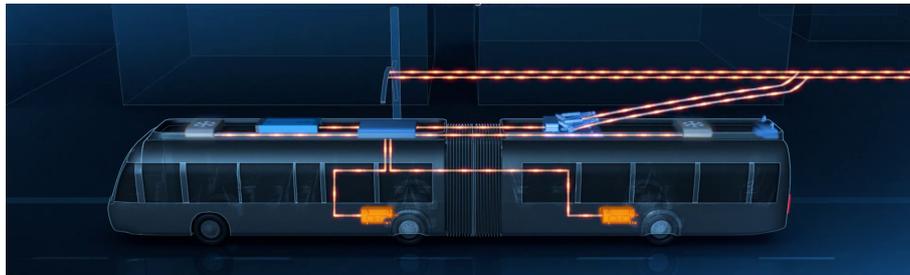


Abb. 8: Über die IMC500 Ladetechnik werden an den Streckenabschnitten mit Oberleitung die Akkus aufgeladen und die Motoren und die Heizung bzw. Klimaanlage mit Strom versorgt. Am Ende der Oberleitung wird der Stromabnehmer eingeklappt.

Quelle: [35]

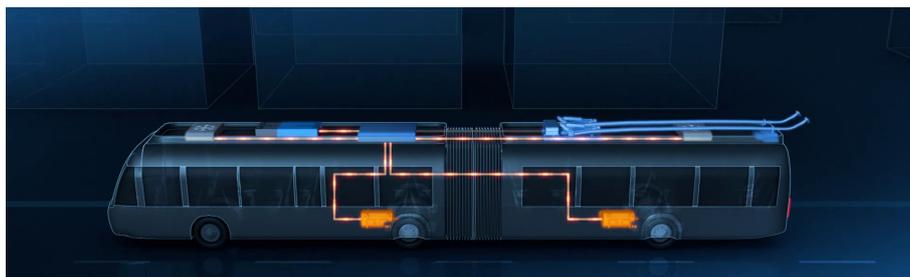


Abb. 9: Der Stromabnehmer ist nun eingeklappt, um den nächsten Streckenabschnitt, unabhängig von der Oberleitung, mit den Akkus zurückzulegen. Die Heizung bzw. Klimaanlage sowie sonstige Einrichtungen des Busses werden ebenso von den Akkus versorgt.

Quelle: [35]

⁸Diese Bezeichnung ist nicht korrekt, da keine 2 Antriebsarten verbaut werden. In Deutschland wird das System fälschlicherweise mit diesen Begriffen bezeichnet [82].

⁹„IMC500 beinhaltet eine Energieübertragung von der Infrastruktur in das Fahrzeug mit einer Leistung von bis zu 500kW. Hierbei werden die Motoren von z.B. 2 x 160 kW parallel zu der Batterieladung mit z.B. 200kW versorgt [34].“

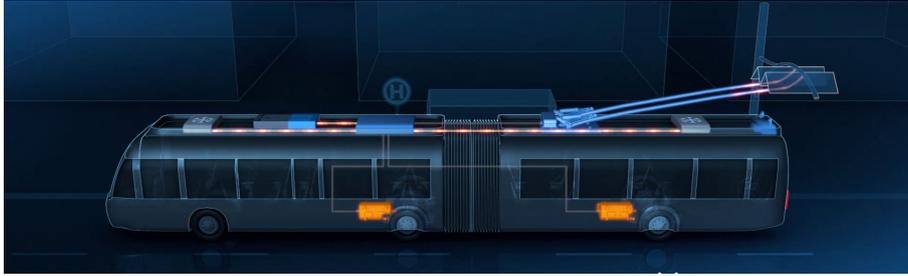


Abb. 10: Zusätzlich zu der IMC Ladetechnik ist Opportunity Charging möglich, um den Einsatzradius der Busse zu erweitern.

Quelle: [35]



Abb. 11: Zuletzt wird der Stromabnehmer wieder an die Oberleitung angeschlossen, um die Akkus während der Fahrt laden zu können.

Quelle: [35]

Im Vergleich zur Abbildung 3, sind die Unterschiede in der Systemskizze der akkubetriebenen Trolleybusse in Abbildung 12 schnell ersichtlich. Zusätzlich zur Oberleitung wird im Bus ein Akku als Stromquelle verbaut, um die flexible Linienführung zu ermöglichen.

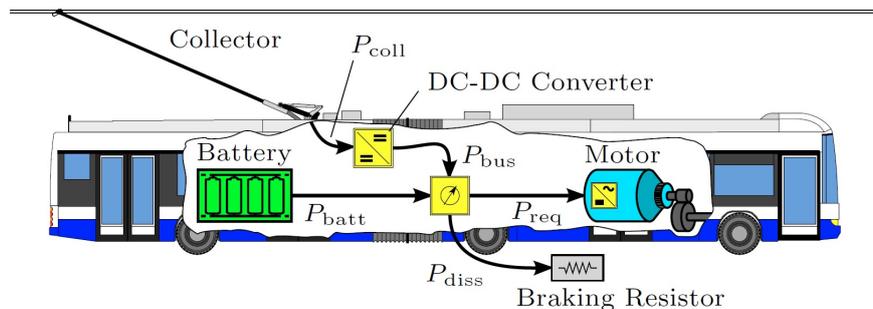


Abb. 12: Systemskizze eines akkubetriebenen Trolleybusses

Quelle: [55]

Im Wesentlichen treffen die zuvor erwähnten Ausführungen zu den Oberleitungsbussen auf den akkubetriebenen Trolleybus ebenso zu. Allerdings mit dem wichtigen Unterschied, dass diese für den planmäßigen und längerfristigen Betrieb abseits der Oberleitung gedacht sind. Es kommen dieselben zweipoligen Fahrdrähte zur Anwendung und die Isolation der elektronischen Komponenten vom Fahrzeug ist genauso zu beachten. Hingegen zu regulären Oberleitungsbussen, können die Streckenabschnitte an denen Oberleitungen verbaut werden, vorab definiert werden. Vor allem bieten sich lange und gerade Straßenzüge oder Abschnitte mit einer Steigung an. Aus dem aktuellen Stand der Technik geht hervor, dass die Infrastruktur der Oberleitungen auf rund 50 % reduziert werden kann. Mit genauer Planung und perfekten Einsatzbedingungen kann die Infrastruktur an 30-40 % der Gesamtstrecke bzw. Gesamtfahrzeit ausreichend sein [3].

Besonders für folgende Anwendungen, am besten eine Kombination aus diesen, ist der akkubetriebene Trolleybus mit Streckenladung am sinnvollsten eingesetzt [87]:

- hohe Nachfrage oder/und hohe Frequenz (linienübergreifende Nutzung der Oberleitungsabschnitte),
- hohe Tageskilometerzahl bzw. lange Strecken (laden während der Fahrzeit reduziert bzw. eliminiert Stehzeit),
- Gelände mit vielen Höhenunterschieden (Unterstützung in steilen Streckenabschnitten mit Oberleitungen reduziert die erforderliche Akkugröße und Akkuleistung),
- BRT¹⁰-Linien mit großen Fahrzeugen.

Ein guter Vergleich der Kosten von akkubetriebenen Trolleybussen mit Streckenladung zu Straßenbahnen findet sich in [28]:

„Eine 15 km lange Trolleybuslinie mit DC¹¹ oder IMC vom Außenviertel durch die Innenstadt bis zum anderen Außenviertel, verteilt in 5 km mit Fahrleitung, 5 km ohne Fahrleitung in der Innenstadt und wiederum 5 km mit Fahrleitung, sollte an Infrastruktur nicht mehr als 15 Mio Euro erfordern. Dazu kämen 15 Mio Euro für 15 Doppelgelenk-Trolleys. Insgesamt 30 Mio Euro für 15 km Linienlänge oder 2 Mio Euro/km. Dafür hat man eine „gummibereifte Stadtbahn“ mit einer Lebensdauer von mindestens 15 Jahren. Das kostengünstigste neue Tramsystem etwaiger gleicher Kapazität (12,5 km) in Besançon mit 19 CAF 23 x 2,4 m Trams kostete 20 Mio Euro/km.“

1.4.2 Vor- und Nachteile von akkubetriebenen Trolleybusse

Während Oberleitungsbusse vielerorts als altmodisch eingestuft werden, schafft es das System der akkubetriebenen Trolleybusse durch die Streckenladung, die Vorteile der Oberleitungsbusse mit den Vorteilen der Elektrobusse zu verbinden [4]. Dabei wird auf der bekanntermaßen ausgereiften Technik der Oberleitungsbusse aufgebaut [11].

Die Herstellung des Fahrdragnetzes stellt anfangs eine hohe Investition dar. Dadurch, dass die notwendige Infrastruktur auf bis zu 30 %¹² der Gesamtstrecke bzw. Gesamtfahrzeit reduziert werden kann, verringert sich die Summe bedeutend. Speziell wenn sich mehrere Buslinien denselben Straßenzug mit Oberleitungen teilen, rentiert sich die Investition rasch [3]. Die Wahl der Streckenabschnitte ist grundsätzlich frei. Um die Akkus möglichst gering zu beanspruchen bietet es sich an, Teilstrecken mit Steigungen mit Oberleitungen auszuführen. Denn bereits bei einer Steigung von 5 % erhöht sich der Energieverbrauch auf das Dreifache [24]. Aufgrund der einfacheren Montage sind lange und gerade Straßenzüge rentabel.

Nachdem die Fahrzeuge ohnehin mit beweglichen Stromabnehmerstangen ausgestattet sind, ist es möglich eine Strecke mit Gegenverkehr mit einem einzigen Paar Fahrdrähten auszuführen. Sobald sich zwei akkubetriebene Trolleybusse begegnen, zieht der eine Bus die Stromabnehmerstangen ab, um dem entgegenkommenden Bus die Weiterfahrt an der Oberleitung zu ermöglichen. Danach kann sich der Bus wieder an den Fahrdraht anlegen. Naheliegend ist es, auf komplizierte Verschneidungen der Fahrleitungen wie in Kreuzungsbereichen oder bei Abzweigungen zu verzichten, da ohnehin durch das einfache Abziehen der Stromabnehmer diese Verschneidungen

¹⁰ „Das Schnellbussystem (BRT) ist ein öffentliches Verkehrssystem zur Verbesserung von Kapazität und Zuverlässigkeit in verkehrsüberlasteten Städten. Es basiert auf separaten Busspuren [Fahrstreifen in Österreich, eigene Anmerkung], die ausschließlich von den von BRT-Unternehmen betriebenen, großen Bussen genutzt werden können [29].“

¹¹Dynamic Charging = In Motion Charging = Streckenladung

¹²Genauere Erläuterungen zu den Grenzwerten folgen in den kommenden Kapiteln

überbrückt werden können [41]. Zuletzt sei zu den Oberleitungen erwähnt, dass durch die Flexibilität in der Anordnung, wie in Abbildung 13 zu erkennen, auf die Montage von Oberleitungen im Umfeld von wichtigen Denkmälern oder stadtbildnerisch sensiblen Bereichen verzichtet werden kann. Ob die Anordnung der Fahrleitungen in der Mitte des Systems oder am Ende erfolgt, kann in Abhängigkeit der lokalen Gegebenheiten bestimmt werden [10]. Inwiefern sich die Anordnung auf die benötigte Akkukapazität auswirkt, ist in Abbildung 23 zu sehen.



Abb. 13: Stadtplätze können frei von Oberleitungen bleiben. Im Zentrum wird der Akku als Stromquelle genutzt. Beim Verlassen des Stadtzentrums werden die Stromabnehmer automatisch an die Oberleitung angeschlossen. Rechts im Bild ist ein Bus zu sehen, der über *Opportunity Charging* die Akkus zusätzlich auflädt.

Quelle: [34]

Der wohl bedeutendste Vorteil, der mit der Flexibilität der Linienführung einhergeht, ist, dass mit akkubetriebenen Trolleybussen Linienverlängerungen bzw. Linienverlängerungen von bestehenden Oberleitungsnetzwerken möglich werden. Die Nutzung des in vielen Städten vorhandenen Netzwerks von Oberleitungen ermöglicht, dass die Busse im laufenden Betrieb im Zentrum aufgeladen werden, anschließend die Stadt verlassen und mehrere Kilometer akkubetrieben zurücklegen. Ein gutes Beispiel für die Flexibilität des Systems war der Versuch der öffentlichen Anbindung des *Open'er Festivals* am Flughafen Gdynia-Kosakowo. Für das 4-tägige Festival in Polen waren kurzfristig zu wenig Busse verfügbar. Daher wurden die bestehenden akkubetriebenen Trolleybusse verwendet, um die Verbindung für diese Zeit im Linienbetrieb herzustellen. Im Zentrum der Stadt konnten die Trolleybusse während des Betriebs an den Oberleitungen geladen werden und anschließend Strecken von bis zu 29 km akkubetrieben zurücklegen [4].

Ein zusätzlicher Vorteil im Vergleich zu akkubetriebenen Bussen ist, dass die Akkukapazität viel geringer ausfallen kann (vgl. Abbildung 14). Durch das ständige Nachladen an der Oberleitung sind für die Teilstrecken, trotz ganztägigem oder 24-stündigem Betrieb, kleinere Akkus ausreichend. Im Vergleich zu Gelegenheitsladern (*Opportunity Charging*), kann durch die Streckenladung der Fahrgastraum 10 % größer ausfallen [87]. Nachdem die Akkus einen hohen Einfluss auf das Gesamtgewicht der Busse haben, wirkt sich die Reduktion der Akkus gleichzeitig positiv auf die Effizienz bzw. Verbrauch des Fahrzeuges aus. Falls nach langjährigem Betrieb die Akkus das Ende ihrer Leistungsfähigkeit erreicht haben, ist die Erneuerung bei akkubetriebenen Trolleybussen günstiger als bei akkubetriebenen Bussen [82].

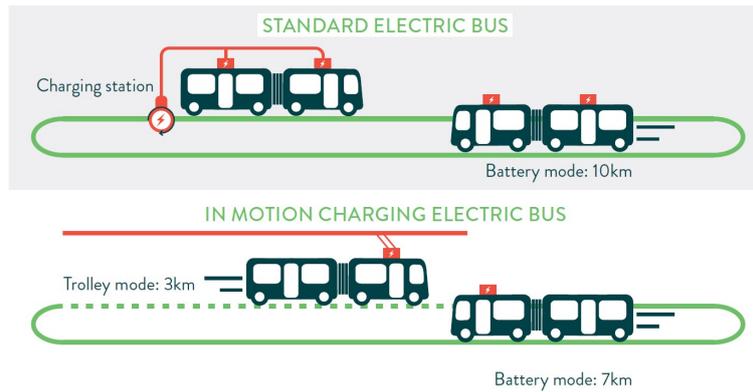


Abb. 14: Für akkubetriebene Trolleybusse sind nicht nur weniger Oberleitungen erforderlich, sondern auch kleinere Akkus ausreichend.

Quelle: [87]

Ein für den täglichen Betrieb relevanter Vorteil ist, dass sich die Stehzeiten minimieren, da die Traktionsakkus laufend geladen werden. Infolgedessen kann die Anzahl der erforderlichen Busse, die für einen durchgängigen Linienbetrieb erforderlich sind, reduziert werden. Die Stromspitzen, sowohl auf die Stromversorgung als auch auf die Akkus im Ladevorgang, werden mit dieser gleichmäßigen Ladestrategie vermieden [11]. Weniger Busse bedeutet gleichzeitig, dass weniger Busfahrerinnen und Busfahrer benötigt werden, um den Betrieb aufrecht zu erhalten. Da Busfahrer einen besonders hohen Kostenpunkt des Betriebs eines Öffentlichen Verkehrssystems darstellen, ist dies kein unbedeutender Vorteil [9].

Das System der akkubetriebenen Trolleybusse lohnt sich besonders, wenn ein bestehendes Oberleitungsnetzwerk vorhanden ist. Für die Einführung der Linienverlängerung mit den eObussen in Salzburg war nahezu keine Änderung der elektrischen Infrastruktur erforderlich. Einzig ein zusätzliches Gleichrichterwerk war zur Leistungsverstärkung notwendig, um die Linie um 4,2 km zu verlängern zu können [52]. Als Nachteil des Systems muss dennoch angeführt werden, dass eine Investition in ein Oberleitungsnetzwerk unumgänglich für den Betrieb ist, auch wenn diese wie im Zitat in Unterunterabschnitt 1.4.1 ersichtlich, einen Bruchteil im Vergleich zu der notwendigen Infrastruktur für eine Straßenbahn ausmacht.

Ein weiterer Nachteil, der im Grunde genauso auf reguläre Oberleitungsbusse bzw. Busse im Allgemeinen zutrifft, ist, dass in Städten die aufgrund des MIV¹³ schon mit Staus zu kämpfen haben, eine Einführung eines derartigen Systems möglicherweise nicht direkt zu einer Verbesserung der Situation führt. Ein Bussystem kann erst durch eine Priorisierung gegenüber dem MIV seine Vorteile ausspielen. Demnach kann neben den Investitionen für ein Netzwerk aus Fahrdrähten zusätzlich eine Einschränkung des MIV erforderlich sein, um die Busse im Verkehr vorziehen zu können (vgl. Abbildung 15).

Nachdem die Frage nach der Beständigkeit der Akkus heute noch nicht vollständig geklärt ist, ist die Abhängigkeit von Energiespeichern ebenso als ein Nachteil des Systems anzusehen. Die mögliche Lebensdauer der Akkus ist aufgrund fehlender Langzeiterfahrungen noch nicht endgültig geklärt. Genauso birgt die Frage der Nachhaltigkeit und der Recyclingfähigkeit noch einige Unbekannte in sich. Die Auswirkungen oder die Risiken sind durch die deutlich geringere Akkukapazität, im Vergleich zu Elektrobussen, für das System der akkubetriebenen Trolleybusse um ein Vielfaches geringer.

Der letzte Nachteil akkubetriebener Trolleybusse ist, dass das System eine sorgfältige Planung des Netzwerks erfordert, um einen zuverlässigen Betrieb einer Linie zu ermöglichen. Bereits kleine Änderungen in der Planung, zum Beispiel der Positionen der Oberleitungsabschnitte (vgl. Abbildung 23), haben bedeutende Auswirkungen auf die erforderlichen Ressourcen einer Linien-

¹³motorisierten Individualverkehrs

verlängerung. Bei regulären Oberleitungsbussen sind derartige Überlegungen nicht notwendig, da ohnehin die Stromversorgung entlang der gesamten Strecke gegeben ist.



Abb. 15: Fahrspur der BRT-Linie 71 in Shanghai
Quelle: [19]

2 Akkubetriebene Trolleybusse rund um die Welt

2.1 eObus am Beispiel von Salzburg

Alle wichtigen Kenndaten zur Linienverlängerung der Oberleitungsbuslinie 5 (Endstationen: Itzling Pflanzmann und Grödig Untersbergbahn) in Salzburg sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Linie verkehrt werktags in einem Intervall von 10 min, wobei jeder zweite Bus die oberleitungsfreie Strecke von 4,2 km zur Station *Grödig Untersbergbahn* zurücklegt. Bei der Station *Weidenstraße* löst der eObus automatisch die Stromabnehmer von der Oberleitung und setzt die Fahrt akkubetrieben bis zur Endstation fort [58]. Aktuell wird der eObus auf 8,4 km im Linienbetrieb eingesetzt. Die Reichweite von 20 km beschreibt die maximale Reichweite unter optimalen Betriebsbedingungen [51].

Tab. 1: Übersicht eObus Salzburg (Österreich) nach [13], [7],[51], [28], [52]

Salzburg, Österreich	
	
Quelle: [59]	
Fahrzeugdaten	
Hersteller und Modell	HESS lightTram [®] 19 DC
Fahrgestell	1-Gelenk-Bus
Länge	18,75 m
max. Gesamtgewicht	29 t
Transportkapazität	155+1 (38 Sitzplätze)
Akkukapazität	60 kWh
Akku-Typ	Litium-Titan-Oxyd-Batterien
Motor	flüssigkeitsgekühlter Permanent-Magnet-Motor
Stromquelle	600 V
Streckendaten	
Strecke Normalbetrieb (Oberleitung)	15,6 km
Fahrzeit Normalbetrieb (Oberleitung)	62 min
Strecke Normalbetrieb (Akku)	8,4 km
Fahrzeit Normalbetrieb (Akku)	28 min
Strecke Abendverkehr (Oberleitung)	11,4 km
Fahrzeit Abendverkehr (Oberleitung)	32 min
Maximale Strecke akkubetrieben	rund 20 km
Sonstiges	
<ul style="list-style-type: none"> • Energieverbrauch des gesamten Obussystems in Salzburg (Jänner und Dezember 2020): 2,28 kWh/km • Energieverbrauch eObus (Jänner und Dezember 2020): 2,04 kWh/km (im Vergleich zum gesamten Obussystem unterdurchschnittlich) • Energieverbrauch eObus (Februar 2021, Kälteperiode): 3,51 kWh/km • Rekuperation im Betrieb rund 20 % • Maximalgeschwindigkeit rund 80 km/h im Akkubetrieb • weitere Linienweiterungen im Bereich von 10-20 km angedacht 	

2.2 International

Das System der akkubetriebenen Trolleybusse ist bereits seit mehreren Jahren weltweit im Einsatz. Die Tabelle 10 (siehe Anhang) soll einen Überblick über einige ausgewählte Einsatzgebiete bzw. Städte geben. Zu weiteren Ländern, die aufgrund fehlender Informationen in Tabelle 10 nicht enthalten sind, zählen zum Beispiel:

- Frankreich (Saint-Étienne)
- Türkei (Malatya und Sanliurfa)
- Schweden (Landskrona)
- Vereinigte Staaten (San Francisco und Seattle, New Flyer: Xcelsior XT40 und XT60)
- Kanada (Vancouver: New Flyer E60LFR)
- Argentinien (Rosario)
- China (Peking und Shanghai)

3 Technische Hintergründe akkubetriebener Trolleybusse

3.1 Elektrisches Netzwerk

Das Oberleitungsnetzwerk ist für Oberleitungsbusse grundsätzlich erforderlich, jedoch für akkubetriebene Trolleybusse mit Streckenladung nicht überall notwendig. In Abbildung 16 ist eine Übersicht von der Stromerzeugung bis zur Streckenladung dargestellt. Vereinfacht kann der Aufbau des elektrischen Netzwerks in die drei Komponenten Unterwerke, Speiseleitungen und Oberleitungen aufgeteilt werden [22]:

Unterwerk

Aus dem öffentlichen Stromnetzwerk wird die Energie entnommen und in einem Unterwerk an die Anforderungen der Fahrzeuge angepasst. Zum Beispiel wird wie in Abbildung 16 ersichtlich, der Dreiphasenwechselstrom aus dem Hochspannungsnetz mit einem Gleichrichterunterwerk auf das Gleichspannungssystem der akkubetriebenen Trolleybusse umgewandelt.

Speiseleitung

Der zuvor im Unterwerk umgewandelte Strom versorgt über Speiseleitungen das Netzwerk der Oberleitungen. Weitere Aufgaben sind zum Beispiel die Zuleitung für stationäre Ladestationen an Endhaltestellen oder im Depot.

Oberleitungen

Der letzte Baustein des elektrischen Netzwerks, die Oberleitung, versorgt nun die Oberleitungsbusse mit Energie. Mit einem auf rund 6 m langen Stromstangen montierten Stromabnehmerkopf wird die Energie aus der Oberleitung entnommen und bei akkubetriebenen Trolleybussen direkt in den Antriebsstrang und die Akkus eingespeist. Die sogenannte *Speiseweite* begrenzt die maximale Länge der Speise- und Oberleitungen. Folglich sind für die Versorgung des gesamten Oberleitungsnetzwerks mehrere Unterwerke erforderlich, um den Leistungsbedarf zu decken.

Für die Anordnung von Fahrdrähten für akkubetriebenen Trolleybussen mit Streckenladung sprechen folgende Punkte [87]:

- geringere Akkukapazität notwendig (in Abhängigkeit der Oberleitungslänge bzw. Oberleitungsanordnung),
- größerer Fahrgastraum,
- Ladung der Akkus im laufenden Betrieb verhindert Stehzeiten,
- flexible Anordnung möglich (Nutzung von verschiedenen Buslinien),

- rezyklierbar und
- verbessert Leistung für Heizung oder Kühlung.

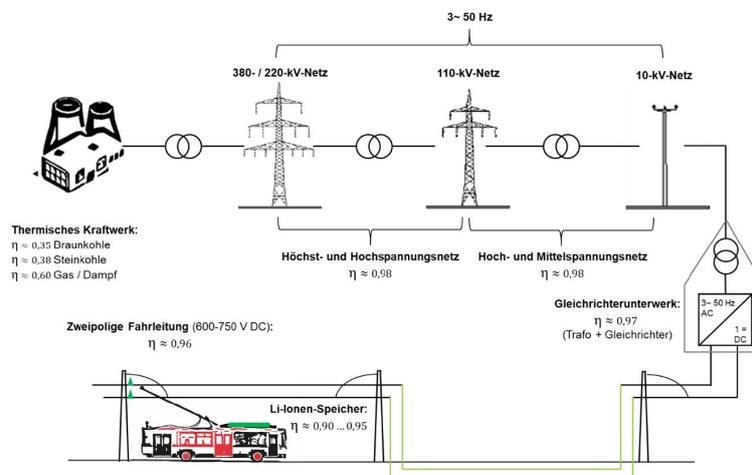


Abb. 16: Übersicht Gesamtsystem akkubetriebener Trolleybusse mit Streckenladung
 Quelle: [22, S. 29]

Um einen durchgehenden Betrieb einer Buslinie zu ermöglichen ist sicherzustellen, dass die Traktionsakkus in den Streckenabschnitten mit Oberleitungen soweit geladen werden, dass die oberleitungsfreie Strecke akkubetrieben zurückgelegt werden kann. Die Länge der notwendigen Ladeabschnitte ist überdies von der maximalen Ladeleistung der Akkus abhängig [4]. Zum heutigen Stand der Technik ist es mit der IMC500 Streckenladung möglich, mit einem Oberleitungsanteil von rund 30 % die restlichen 70 % der Strecke akkubetrieben zurückzulegen [87]. Bei dem in Unterunterabschnitt 1.4.2 erwähnten Projekt zur vorübergehenden Linienenerweiterung für das *Open'er Festivals* in Polen konnten nach der Auswertung der gesammelten Daten einige grundlegende Regeln für das System ermittelt werden [4]:

1. Mindestens 33 % der Strecke sollen mit Oberleitungen ausgestattet sein, um einen sicheren und durchgängigen Betrieb der Linien zu ermöglichen. Zudem gilt es zu berücksichtigen, dass die Ladezeiten unter der Oberleitung mindestens 33 % der Gesamtfahrzeit beträgt. An den relevanten Stellen der Strecke, mit dem planmäßig niedrigsten Ladezustand der Akkus, können Ladevorrichtungen für den Notfall erforderlich sein.
2. Wenn die Ladezeiten unter der Oberleitung nicht ausreicht, sind an 50 % der Strecke Oberleitungen zu errichten.
3. Wenn die Infrastruktur nur an 30-32 % der Strecke vorhanden ist, kann durch die Änderung der Linienführung die Strecke unter bestehenden Oberleitungen erhöht werden.
4. Für den Fall, dass an weniger als 33 % der Strecke bzw. 33 % der Gesamtfahrzeit Oberleitungen vorhanden sind müssen die akkubetriebenen Trolleybusse an den Endstationen nachgeladen werden. Als Maßstab kann eine Ladezeit von 2,5 min für jeden zusätzlichen Kilometer ohne Oberleitung angenommen werden.

Die angeführten Punkte dienen nur als Grundlage für die Planung des Oberleitungsnetzwerks. Aufgrund der raschen Entwicklung der Akkuindustrie und durch genaue Planung können in Zukunft die Buslinien auch mit einem kleineren Anteil an Oberleitungen betrieben werden. Zum Beispiel wird für die Linie 695 in Solingen bei einer Gesamtstrecke von 20,1 km auf nur 22 % der Strecke (rund 4,4 km) die Oberleitung zum Nachladen der 60 kWh großen Traktionsakkus

Tab. 2: Vergleich der Streckenabschnitte des eObus Salzburg unter Oberleitung und akkubetriebenen im Normalbetrieb

Die Durchschnittsgeschwindigkeit inkludiert die Wendezeiten. Quelle: [52]

Fahrmodus	Strecke	Fahrzeit	Anteil Strecke	Anteil Fahrzeit	Ø-Geschwindigkeit
Oberleitung	15,6 km	62 min	65 %	69 %	15,1 km/h
Akkubetrieb	8,4 km	28 min	35 %	31 %	18,0 km/h
Summe	24 km	90 min	100 %	100%	

verwendet. Da die Fahrzeit unter Streckenladung, trotz des geringen Oberleitungsanteils von 22 %, 33 % der Gesamtfahrzeit beträgt ist dennoch ein Linienbetrieb möglich. In diesem Fall werden die akkubetriebenen Trolleybusse an der Endstation *Gräfrath* mit einer stationären Ladestation aufgeladen, um die Stehzeit effizient zu nutzen, obwohl eine Ladung nicht zwingend erforderlich wäre [82][87].

Ein weiteres Beispiel für die prozentualen Anteile der Streckenabschnitt unter der Oberleitung bzw. im akkubetriebenen Fahrmodus ist in Tabelle 2 für den eObus in Salzburg zusammengefasst. Die berechnete durchschnittliche Geschwindigkeit inkludiert die Wendezeiten. Prozentual betrachtet unterscheidet sich in diesem Beispiel die Fahrzeit unter Oberleitung (69 %) kaum von der Fahrstrecke unter Oberleitung (65 %). Im Laufe des Betriebs hat sich herausgestellt, dass es mit einem Anteil unter Streckenladung von 50 % der Gesamtfahrzeit möglich ist, den Traktionsakku vollständig aufzuladen [52]. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass mit dem bestehenden Oberleitungsnetzwerk in Salzburg die Linie 5 noch größere Strecken als die aktuellen 8,4 km zurücklegen könnte.

3.2 Antrieb und Verbrauch

Einer der Vorteile der akkubetriebenen Oberleitungsbusse mit Streckenladung ist, dass das System auf das lang bewährte Konzept der regulären Oberleitungsbusse aufbaut. Über eine zweipolige Fahrleitung wird der Antriebsstrang üblicherweise mit 550-750 V Gleichstrom versorgt bzw. die Akkus geladen [20, S. 247]. Je nach Länge und Ausführung der Busse kommen ein oder bei Gelenkbussen oft zwei Motoren zum Einsatz. Die Motoren sind analog zur Bahnelektrik heutzutage Drehstrom-Asynchronmotoren, die über ein Differentialgetriebe meist die Hinterachse des Fahrzeuges antreiben. Die Komplexität des Antriebsstrangs wird durch den Elektromotoren erheblich vereinfacht, da kein Wechselgetriebe erforderlich ist [33].

Bei Elektrofahrzeugen wird der Energieverbrauch in der Einheit kWh/km angegeben. In Tabelle 3 kann der spezifische Energieverbrauch in Abhängigkeit der Fahrzeuglänge abgelesen werden. Die angegebenen Werte dienen als Anhaltspunkt zur Vordimensionierung eines Busnetzes [22]. Die Außentemperatur und die erforderliche Wärme- oder Kühlleistung für die Temperierung des Fahrgastraums haben bei Elektrofahrzeugen einen großen Einfluss auf den Verbrauch. In Tabelle 4 sind Größenordnungen der Auswirkungen der Heizung auf den Verbrauch von Gelenkbussen in Deutschland, bezogen auf ein ganzes Jahr, angegeben. Zusätzlich ist in Abbildung 17 der Verbrauch der eObusse in Salzburg in verschiedenen Zeiträumen dargestellt. Laut dem Diagramm in Abbildung 17 beträgt der durchschnittliche Jahresverbrauch (Zeitraum 01/2020-12/2020) rund 2,0 kWh/km. Im Vergleich dazu ist in den Kälteperioden (Zeitraum 01/2020 und 12.Feb. 2021) ein deutlicher höherer Verbrauch von 3,5 kWh/km zu verzeichnen. Es zeigt sich jedoch, dass der Energiebedarf des Antriebs nahezu konstant bei 1,00 kWh/km bleibt. Der Energiebedarf für die Beheizung des Fahrgastraumes liegt aber in den kalten Zeiträumen bedeutend höher als beispielsweise in einem warmen Sommermonat wie im Zeitraum 07/2020.

Ähnliche Zahlen konnten in Eberswalde (Deutschland) aufgezeichnet werden. Im Durchschnitt

kann hier mit einem Verbrauch von 2,36 kWh/km gerechnet werden. Unter Berücksichtigung der kalten Jahreszeit, kann der Verbrauch durchaus auf 4,43 kWh/km ansteigen [26, S.22]. Dementsprechend ist eine Auslegung des Systems anhand von Mittelwerten, nicht nur mit einer sehr großen Unsicherheit behaftet, sondern kann zu einer Unterdimensionierung der Energiespeicher führen.

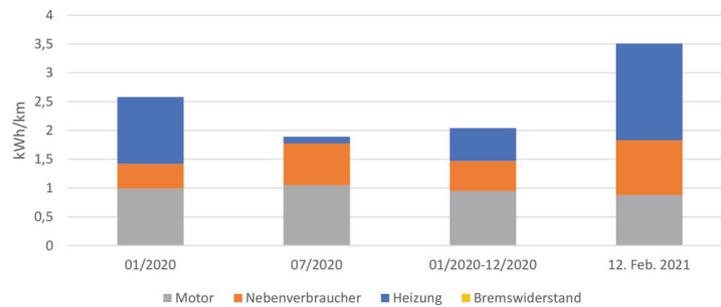


Abb. 17: Durchschnittlicher Verbrauch der eObusse in Salzburg für verschiedene Zeiträume
Quelle: [52, S. 46, Abb. 5]

Tab. 3: Energieverbrauch nach Fahrzeuggröße

Quelle: [22, S. 90, Tab. 3-15]

Modell	spezifischer Energieverbrauch
10 - 12 m Bus	1,5 kWh/km
18 m Bus	2,5 kWh/km
24 m Bus	3,5 kWh/km
Maximum für Systemauslegung	4,5 kWh/km

Tab. 4: Jahresenergieverbrauch für Heizung eines Gelenkbusses mit einer täglichen Betriebsdauer von 18 Stunden in Deutschland

Quelle: [8, S. 35, Tab. 11]

Region	Mittlerer spezifischer Heizenergieverbrauch
Mittelwert der Stundenwerte aller Klimaregionen	0,31 kWh/km
Kälteste Klimaregionen	0,54 kWh/km
Wärmste Klimaregionen	0,25 kWh/km

Die Rekuperation hat einen großen Einfluss auf den Verbrauch von Elektrofahrzeugen. Als Rekuperation wird die Umwandlung der kinetischen Bremsenergie in elektrische Energie bezeichnet. Der Elektromotor wirkt während des Bremsvorgangs wie ein Generator und kann die Bremsenergie wieder in den Akku rückführen und den Verbrauch senken [32, S. 119]. In Zahlen ausgedrückt beträgt das Einsparungspotential zwischen 0,3-0,6 kWh/km [24]. Der Vorteil der akkubetriebenen Trolleybusse im Vergleich zu regulären Oberleitungsbussen ist, dass die rückgewonnene Energie direkt im Akku gespeichert wird und nicht über die Stromabnehmer in das Oberleitungsnetzwerk eingespeist werden muss. Zudem ist für den in die Oberleitungsinfrastruktur zurückgespeisten

Tab. 5: Vergleich der möglichen Reichweite unter Annahme verschiedener Verbräuche für einen 60 kWh Lithium-Ionen-Akku (42 kWh davon nutzbar)

Quelle: eigene Darstellung

Bezeichnung	Verbrauch	mögliche Reichweite
Maximum für Systemauslegung aus Tabelle 3	4,5 kWh/km	9,33 km
12. Feb. 2021 aus Abbildung 17	3,5 kWh/km	12,0 km
geringer Verbrauch lt. [26, S. 22]	2,1 kWh/km	20,0 km
01/2020-12/2020 aus Abbildung 17	2,0 kWh/km	21,0 km

Strom ein Abnehmer erforderlich. Ein Stromabnehmer kann beispielsweise ein Oberleitungsbus sein, der die umgewandelte Bremsenergie eines anderen Oberleitungsbusse aufnimmt.

3.2.1 Mögliche Reichweite von Linienverlängerungen

Bei bekanntem Verbrauch der akkubetriebenen Trolleybusse mit Streckenladung kann die notwendige Akkugröße mit Simulationen bestimmt werden. Umgekehrt kann auch ermittelt werden, welche Strecken theoretisch mit einer vorgegebenen Akkukapazität möglich sind. Heute befindet sich die Kapazität der Energiespeicher bei den akkubetriebenen Trolleybussen mit Streckenladung am Markt im Bereich von 20-100 kWh. Basierend auf Erfahrungen, ist mit Reichweiten im Akkubetrieb von 10-30 km zu rechnen [4][6]. Eine pauschale Antwort für die zu erwartende Reichweite kann schwer gegeben werden, da diese nicht nur von der Beheizung des Fahrgastraums, wie in Tabelle 4 ersichtlich ist, sondern auch maßgebend von der Topografie der Strecke, der Fahrgastanzahl oder der Außentemperatur abhängt [4][6]. Um dennoch eine Abschätzung der Reichweite des Systems zu ermöglichen, kann als grobe Schätzung von einem Verbrauch von 4,5 kWh/km (vgl. Tabelle 3) ausgegangen werden. Hierbei ist wichtig anzumerken, dass es sich um die Reichweite einer Linienverlängerung handelt. Das Fahrzeug verlässt das Oberleitungsnetzwerk mit vollem Akku, legt eine Strecke im Akkubetrieb zurück und setzt anschließend seine Fahrt unter Oberleitung und Streckenladung fort. Unter der Annahme eines 60 kWh Lithium-Ionen-Akkus, bei einer Nutzung von 20-90 % der Kapazität, beträgt die tatsächlich nutzbare Energie 42 kWh. Mit dem zuvor festgelegten Verbrauch von 4,5 kWh/km wäre demnach eine Reichweite von 9,33 km möglich. Im Vergleich zu den Daten aus Tabelle 1 wird klar, dass sich diese einfache Berechnung tatsächlich relativ genau mit der Linienverlängerung in Salzburg von 8,4 km deckt. Dass diese Werte eine eher konservative Annahme darstellen, wird deutlich, wenn die realen Energieverbräuche aus Abbildung 17 eingesetzt werden. Im Sinne der Übersichtlichkeit werden die Reichweiten, bezogen auf eine nutzbare Energie von 42 kWh, in Tabelle 5 verglichen. Die ermittelten Ergebnisse befinden sich im Bereich von 9,33 km bis bestenfalls 21,0 km. Logischerweise muss das System anhand der minimalen Reichweite ausgelegt werden, um einen sicheren Betrieb der Buslinie zu ermöglichen. Mit der großen Schwankungsbreite wird eindeutig, dass eine Linienverlängerung bzw. das System der akkubetriebenen Trolleybusse mit Streckenladung im Allgemeinen eine sorgfältige Planung erfordert und keineswegs mit einfachen Tabellenwerten umsetzbar ist. Nichtsdestotrotz zeigen die Ergebnisse, dass mit dieser Methode eine grobe Schätzung als Basis für die weitere Planung möglich ist.

Um einen Überblick über die potenzielle Reichweite für Linienverlängerungen mit akkubetriebenen Trolleybussen mit Streckenladung mit Akkukapazitäten zwischen 20-100 kWh (nutzbare Energie: 14-70 kWh) zu erhalten, sind in Tabelle 6 und Tabelle 7 die Einsatzbereiche zusammengefasst. Der Verbrauch von 4,5 kWh/km ergibt die Untergrenze und der Verbrauch von 2,1 kWh/km ergibt die Obergrenze der zu erwartenden Reichweite.

Tab. 6: Potenzielle Reichweite für einen 20 kWh Lithium-Ionen-Akku (14 kWh davon nutzbar)

Quelle: eigene Darstellung

Bezeichnung	Verbrauch	mögliche Reichweite
Maximum für Systemauslegung aus Tabelle 3	4,5 kWh/km	3,11 km
geringer Verbrauch lt. [26, S. 22]	2,1 kWh/km	6,67 km

Tab. 7: Potenzielle Reichweite für einen 100 kWh Lithium-Ionen-Akku (davon nutzbar 70 kWh)

Quelle: eigene Darstellung

Bezeichnung	Verbrauch	mögliche Reichweite
Maximum für Systemauslegung aus Tabelle 3	4,5 kWh/km	15,56 km
geringer Verbrauch lt. [26, S. 22]	2,1 kWh/km	33,33 km

3.3 Energiespeicher

Einer der bedeutendsten Vorteile der Trolleybusse mit Streckenladung ist, dass die Traktionsakkus deutlich kleiner sind als die der regulären Elektrobusse. Nachdem die Dauerhaftigkeit der Akkus bis heute mit einer Ungewissheit verbunden ist, ist es naheliegend, die Größe der Akkus weitestgehend zu reduzieren, um die Investitionskosten für eine potenzielle Erneuerung des Energiespeichers gering halten zu können. Mit der Reduktion der Akkugröße geht gleichzeitig die Vergrößerung des Fahrgastraums einher [87].

Die Energiespeicher in akkubetriebenen Trolleybussen mit Streckenladung können bis zu 50 % der Anschaffungskosten eines Fahrzeugs betragen. Mit der steigenden Produktionszahl der Akkus kann davon ausgegangen werden, dass die Preise sinken werden. Aller Voraussicht nach muss der Akku mindestens einmal innerhalb der Lebensdauer des Fahrgestells ausgetauscht werden [5].

Eine Unterscheidung zwischen Akkus und Batterien in der Bezeichnung als Energiespeicher ist besonders wichtig. Denn Batterien können per Definition nach der Entladung nicht mehr verwendet bzw. aufgeladen werden. Daher ist der technisch korrekte, deutsche Begriff für einen wiederaufladbaren Energiespeicher *Akku*. Dennoch wird oftmals bei der Übersetzung des englischen Begriffs in die deutsche Sprache fälschlicherweise das Wort *Batterie* verwendet [32, S. 70].

Im Laufe des Abschnittes soll das Hauptaugenmerk auf den Lithium-Ionen-Akkus liegen, da diese gegenwärtig im Großteil der akkubetriebenen Trolleybusse mit Streckenladung verwendet werden.

3.3.1 Akkutechnologien im Überblick

In den letzten 20 Jahren haben sich drei chemische Zelltypen in der Entwicklung der Elektrofahrzeuge durchgesetzt [32, S. 70]:

- Nickel-Metallhydrid-Akkus (NiMH),
- Natrium-Nickelchlorid-Batterien (ZEBRA-Batterien)¹⁴ und
- Lithium-Ionen-Akkus.

Eine weitere Kategorie von Energiespeichern, die oft im Zusammenhang mit Akkus erwähnt werden, sind die sogenannte *Supercaps* oder *Superkondensatoren*. Diese speziellen Kondensatoren sind nicht in die Kategorie der chemischen Energiespeicher einzuordnen, sondern sind der Gruppe

¹⁴In der Literatur wird dieser Zelltyp mit dem Begriff *Batterie* bezeichnet, obwohl es sich um einen wiederaufladbaren *Akku* handelt.

der elektrischen Energiespeicher zugehörig. Aufgrund der Eigenschaften von Superkondensatoren sind diese, im Gegensatz zu Lithium-Ionen-Akkus, für das kurzzeitige Speichern von Energie geeignet (vgl. Abbildung 20). Bereits im Jahr 2005 wurde die Technik als Kurzzeitspeicher im *UltraCap-Bus* des Unternehmens MAN zur vorübergehenden Speicherung der rückgewonnenen Bremsenergie verwendet, um den Energieverbrauch beim Anfahren des Busses zu reduzieren [89]. In Abbildung 18 ist eine Übersicht über die derzeit relevanten Energiespeichersysteme gegeben. Für den Einsatz in Oberleitungsbusen bzw. Elektrofahrzeugen im Allgemeinen sind die chemischen und elektrischen Energiespeicher von größter Bedeutung. Die Tabelle 8 und Tabelle 9 geben eine detaillierte Übersicht über verschiedene Energiespeicher im Vergleich.

Tatsächlich durchgesetzt haben sich bei den Langzeitenergiespeichern im Bereich der Elektrobusse schlussendlich die Lithium-Ionen-Akkus.

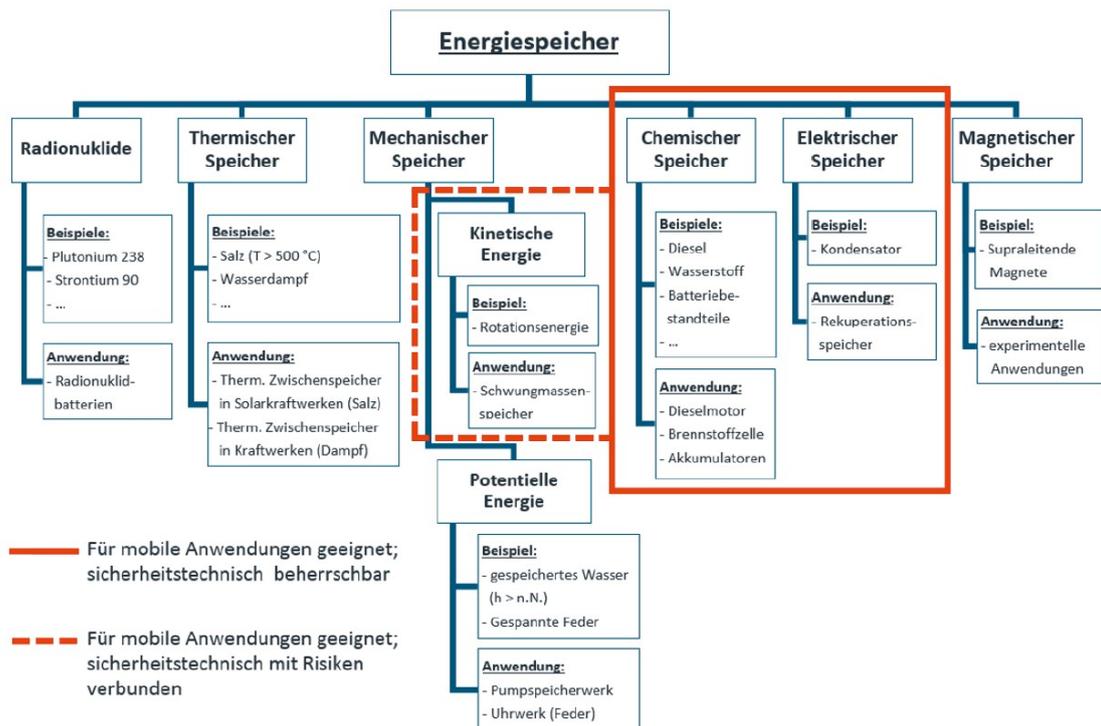


Abb. 18: Übersicht derzeit verfügbarer Energiespeicher
Quelle: [26, S. 23, Abbildung 17]

Tab. 8: Vor- und Nachteile aktueller Energiespeicher

[21, S. 13, Abbildung 6] zitiert nach [26, S. 24, Tab. 6]

	Wasserstoff-Brennstoffzelle (PEM-Brennstoffzelle)	Lithium-Ionen-Akkumulatoren	Doppelschicht-Kondensatoren (Super-Caps)	Nickel-Metall-Hybrid-Akkumulatoren (NiMH)	Diesel
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ Energiedichte H₂ dreimal so hoch wie Benzin (33.3kWh/kg) ■ „betankbar“ ■ Hohe Lebensdauer und Zyklenzahl 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Hohe spezifische Energie ■ Hohe Zell-Nennspannung ■ Gute Zyklenfestigkeit und Lebensdauer (mit Thermo- und Batteriemanagement) möglich ■ Kein „Memory Effekt“ ■ Geringe Selbstentladung 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Zuverlässig, robust und wartungsarm ■ Hohe kalendrische Lebensdauer, sehr hohe Zyklenzahl ■ Sehr große Leistungsdichte ■ Hoher Wirkungsgrad (95%) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Zuverlässig und robust, tiefentladefähig ■ Lange Standzeit im entladenen Zustand ■ Bei tiefen Temperaturen entladefähig 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Hohe Energiedichte 11,8 kWh/kg; 9,8 kWh/l ■ Hoher thermischer Wirkungsgrad
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ Wirkungsgrad (48%, Brennstoffzelle) gering, allerdings noch besser als Verbrennungsmotor ■ Gesamtwirkungsgrad ca. 20% ■ Speicherung von Wasserstoffproblematisch ■ Infrastruktur noch nichtvorhanden ■ Hohe Kosten für Brennstoffzellensystem ■ Wärmeabfuhr der Niedertemperatur-Brennstoffzelle problematisch 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Hohe Kosten ■ Reaktiv mit Luft und Feuchtigkeit ■ Aufwendiges Batteriemanagement (elektrisch und thermisch) ■ Temperaturanfälligkeit ■ Nutzbare Energiedichte oft geringer als angegeben 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Hohe Selbstentladung (parasitäre, interne Ströme) ■ Großer Spannungshub ■ Sehr kleine Energiedichte ■ Hoher Überwachungsaufwand ■ Großes Gefahrenpotenzial im Abuse-Fall ■ Hohe Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Hohe Selbstentladung (besonders bei erhöhter Temperatur) ■ Schlechte Zyklen Effizienz ■ Nur bedingt schnellladefähig ■ Relativ geringe Energiedichte 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fossiler Brennstoff ■ Rußbildung ■ Filter erforderlich

Tab. 9: Fazit aktueller Energiespeicher

[21, S. 13, Abbildung 6] zitiert nach [26, S. 24, Tab. 6]

PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle*BEV:* Battery electric vehicle*ÖPSV:* Öffentlicher Straßenpersonennahverkehr

	Wasserstoff-Brennstoffzelle (PEM-Brennstoffzelle)	Lithium-Ionen-Akkumulatoren	Doppelschicht-Kondensatoren (Super-Caps)	Nickel-Metall-Hybrid-Akkumulatoren (NiMH)	Diesel
Fazit	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gute Eignung für Energiespeicherung/Wandlung im stationären Bereich ■ Mobiler Bereich bisher nur im Probeversuch ■ Kostenreduktion notwendig für automobilen Einsatz ■ Kostengünstige und umweltschonende Herstellung von H₂ zwingend erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Höchstes Potenzial, allerdings noch hohe Kosten für den Einsatz bei Elektrotraktion ■ Geringe Stückzahl für geringe Anzahl an E-Fahrzeugen zunächst problematisch ■ Optimierte Produktion und Serienreife bei Consumer Products 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Die Kombination von Super-Caps mit Speichern hoher Energiedichte bietet Potenzial ■ Einsatz als reiner Traktionspeicher aufgrund der Energiedichte auf kurze Strecken (ca. 1.000 m) begrenzt 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Aufgrund der relativ geringen Energiedichte, der hohen Selbstentladung und der schlechten Schnellladefähigkeit sind NiMH-Akkumulatoren nur bedingt für PHEV und BEV geeignet ■ Das System ist allerdings ausgereift und sehr robust 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Aufgrund hoher Energiedichte nach wie vor interessant ■ Wegen Schadstoffausstoßes und dem Verbrauch fossiler Brennstoffe mittelfristig für ÖPSV nicht mehr geeignet

Die aktuell gängigsten Energiequellen für Elektrofahrzeuge sind Lithium-Ionen-Akkus. Diese Zellen bestehen aus einer negativen (Anode) und einer positiven Elektrode (Kathode) die durch einen Separator getrennt sind. Für die Anode wird meist Graphit oder amorphe Kohlenstoffe verwendet. Als Stoffe für die Kathode kommen verschiedene Lithium-Metalloxide wie zum Beispiel Nickel-Kobalt-Aluminium oder Eisen-Phosphat zum Einsatz. In der Forschung und Entwicklung werden viele alternative Kombinationen an chemischen Bestandteilen untersucht um die Energiequelle zu optimieren [32, S. 73]. Unter anderem wird momentan an Lithium-Schwefel-Akkus geforscht. Mit dieser Akkutechnologie wäre, bezogen auf die heutzutage verwendeten High-Power Lithium-Ionen-Akkus, eine Verfünfachung der Energiedichte auf der Zellebene umsetzbar. Für stark frequentierte Buslinien, steile Streckenverläufe oder bei hohem Nebenverbrauch durch die Klimatisierung des Fahrgastraums in kalten Klimaregionen, wäre dieser Energiezuwachs besonders von Nöten [22]. In Abbildung 19 werden die Unterschiede vier verschiedener Lithium-Ionen-Akkus verglichen.

Die Technologie der Lithium-Ionen-Akkus scheint sich durchzusetzen. Zusätzlich sind die folgenden Punkte zu den in Tabelle 8 angeführten Nachteilen hinzuzufügen [32, S. 73]:

- Die Kapazität der Akkus reduziert sich laufend mit der Zahl der Ladezyklen.
- Da der Ladestrom begrenzt ist, kommt es zu langen Ladezeiten.
- Die Akkus dürfen weder über- noch tiefentladen werden.
- Im Vergleich zu den fossilen Brennstoffen Benzin (12 kWh/kg) oder Diesel (11,9 kWh/kg), ist die Energiedichte von Lithium-Ionen-Akkus (0,13 kWh/kg) dennoch gering.

Zur Abgrenzung der Einsatzbereiche der zu Verfügung stehenden Energiequellen werden die Optionen oftmals in dem nach *David V. Ragone* benannten *Ragone Plot*, wie in Abbildung 20,

dargestellt. Hierbei wird die spezifische Energie (Wh/kg) mit der spezifischen Leistung (W/kg) gegenübergestellt.

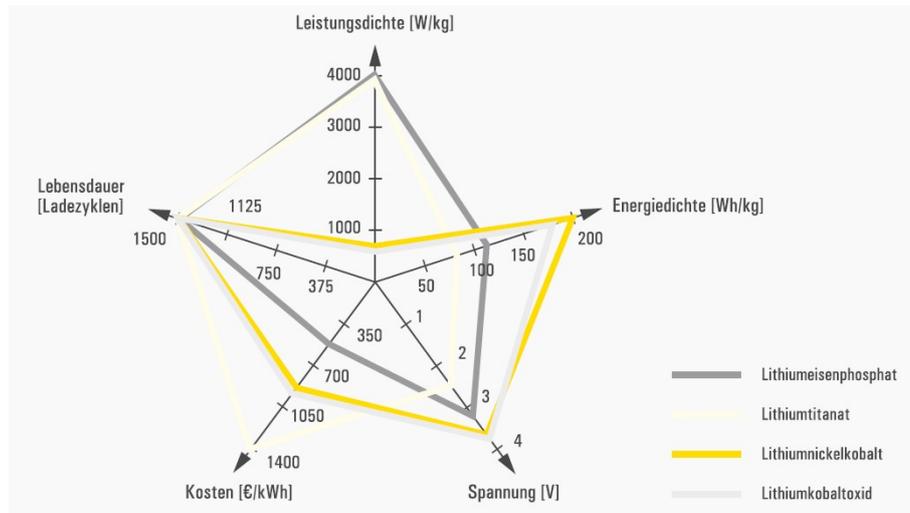


Abb. 19: Übersicht aktueller Energiespeicher

Quelle: [21, S. 15, Abbildung 7]

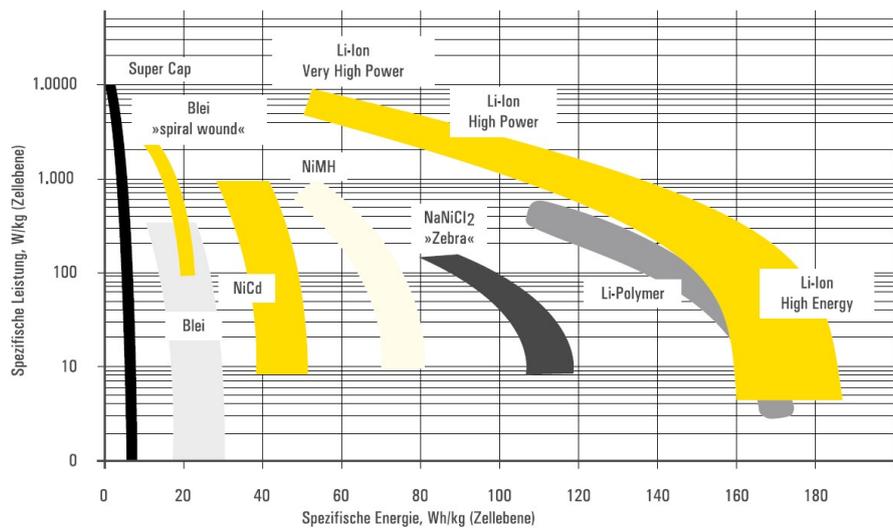


Abb. 20: Ragone Plot verschiedener Energiespeicher

Quelle: [21, S. 11, Abbildung 4]

3.3.2 Lebensdauer von Akkus

Die Lebensdauer der Akkus von Elektrofahrzeugen ist, trotz der von Jahr zu Jahr steigenden Verkaufszahlen, mit einer großen Ungewissheit verbunden. Bezogen auf akkubetriebene Trolleybusse wird aktuell von einer Lebensdauer von 6-8 Jahren ausgegangen. Eine Erneuerung kann bei einem Leistungsabfall auf 80 %¹⁵ der ursprünglichen Leistung bzw. durch die Reduktion der Kapazität mit steigender Ladezyklenzahl, früher notwendig sein [82]. Grundsätzlich können die Energiespeicher länger, das heißt unter 80 % der ursprünglichen Kapazität, in den Bussen eingesetzt werden. Jedoch kann es mit der steigenden Ladezeit zu Einschränkungen des geplanten Betriebs der Linie kommen [37]. Neben der Reduktion der Kapazität ist die zeitliche Alterung

¹⁵Die Grenzwerte können je nach Hersteller variieren und sind zum heutigen Stand noch nicht genormt.

ebenso zu berücksichtigen. Denn die Nichtbenutzung der Akkus wirkt sich negativ auf die Gesamtkapazität aus. Nachdem nahezu jede Akkutechnologie bestimmte Temperaturanforderungen hat, gilt es zudem zu berücksichtigen, dass die Umgebungstemperatur im Betrieb und beim Laden den Anforderungen entspricht [32, S. 79]. Um die Lebensdauer der Lithium-Ionen-Akkus so wenig wie möglich durch die Ladevorgänge einzuschränken, wird empfohlen, die Akkus zwischen 20 % und 90 % der Gesamtkapazität zu halten [56].

Am Beispiel von Rom kann die Ungewissheit der Lebensdauer der Akkus verdeutlicht werden. Im Jahr 2005 wurden 30 Fahrzeuge der Firma Solaris auf der Linie 90 (Roma Termini bis Largo F. Labia) in Betrieb genommen. Die Linie hat auf einer Gesamtlänge von 19,5 km ein Strecke von 3 km ohne Oberleitung mit Akkus zu überbrücken. Der Hersteller der Akkus hat zur Einführung des Systems eine Garantie von 5 Jahren ausgesprochen. Dennoch waren im Jahr 2015, nach 10 Jahren und höher als erwarteter Belastung, in manchen Trolleybussen noch die ersten Akkus im Betrieb [10].

Viele Fragen zum tatsächlichen ökologischen Fußabdruck von Akkus beginnend bei der Produktion über den Betrieb bis zur Nachnutzung, Recycling oder Entsorgung sind noch nicht geklärt. In diesem Zusammenhang erlangt der akkubetriebene Trolleybus mit Streckenladung eine große Bedeutung. Denn durch die Minimierung der erforderlichen Akkugröße und den hohen Kilometerleistungen der Busse können die Emissionen aus der Herstellung, besonders im Vergleich zu privaten Elektroautos, auf sehr viele Kilometer umgelegt werden [52]. Aus den zahlreichen, in Tabelle 10 (im Anhang) angeführten, Beispielen von akkubetriebenen Trolleybussen geht hervor, dass derzeit eine realistische Akkukapazität im Bereich von 30-87 kWh liegt. Am Markt sind Lösungen zwischen 20-100 kWh für akkubetriebene Trolleybusse erhältlich [4][6]. Ein vollkommen elektrischer 12 m langer Bus benötigt einen Akku mit 300 kWh um eine Strecke von 120-130 km (an einem winterlichen Tag bei elektrischer Beheizung des Fahrgastraums) zurücklegen zu können [72]. Der Vergleich zu den Beispielen in Tabelle 10 (im Anhang) ist zwar schwierig, da durch den Linienbetrieb und die Spurbindung der akkubetriebenen Trolleybussen die tatsächliche Kilometerleistung keinen guten Vergleich mit den streckenflexiblen reinen Elektrobussen ermöglicht. Elektrobusse haben meist ein anderes Anwendungsgebiet als akkubetriebene Trolleybusse mit Streckenladung die beispielsweise als Linienverlängerung für ein bestehendes Oberleitungsnetzwerk eingesetzt werden. Dennoch kann ein Elektrobuss der im innerstädtischen Raum stets auf der selben Strecke verkehrt alternativ als akkubetriebener Trolleybus ausgeführt werden. Ungeachtet der verschiedenen Anwendungsbereiche der beiden Systeme, wirken sich kleinere Akkus, neben dem gewichtsspezifischen Vorteil, positiv auf die anfänglichen Investitionskosten, die Ladezeit und die potenzielle Erneuerung eines Fahrzeugs aus.

3.4 Ladetechnik

Für das System der akkubetriebenen Trolleybusse sind, ausgehend von einem bestehenden Oberleitungsnetzwerk, kaum Änderungen für eine Linienverlängerung notwendig. Bei der Verlängerung der Buslinie 5 nach Grödig in Salzburg war, neben der Errichtung eines zusätzlichen Gleichrichterwerks zur Leistungsverstärkung, keine Änderung an der bestehenden Infrastruktur erforderlich [52]. Das abziehen und anlegen der Stromabnehmerstangen von den Fahrdrähten erfolgt automatisch am Beginn oder am Ende eines Oberleitungsabschnittes und dauert zwischen 3-15 Sekunden [87]. Für den Fahrgast ist der Vorgang nicht wahrnehmbar. Zusätzlich ist je nach System eine Anlegehilfe (Funnels) an den jeweiligen Stellen erforderlich, um ein sicheres Anlegen zu ermöglichen. Die Funnels können, wie in Abbildung 21 zu sehen, in transparenter Ausführung hergestellt werden, um optisch weniger aufzufallen. Ein Stillstand ist nicht zwingend erforderlich, da zum Beispiel die Firma *LibroDuct* ein Konzept entwickelt hat, das den Anschlussvorgang während der Fahrt ermöglicht [41].

Die Stromstangen der akkubetriebenen Trolleybusse unterscheiden sich nicht von jenen der regulären Oberleitungsbusse. Der in Abbildung 22 eingezeichnete Seilaufwickler ermöglicht das



Abb. 21: Anlegehilfe (Funnels) in transparenter Ausführung
Quelle: [60]

Einklappen der beiden Stromstangen. Die Stromstangen waren seit jeher in der Lage, den Kontakt von der Oberleitung zu trennen, um zum Beispiel Fahrten im Depot oder ähnlichem zu ermöglichen. Während in der Akkutechnologie in Zukunft mit vielversprechenden Fortschritten gerechnet werden kann, ist das maßgebende Bauteil der akkubetriebenen Trolleybusse aktuell der Stromabnehmer. Die Ladeleistung ist infolge der Temperaturentwicklung zwischen dem Stromabnehmer und den Fahrdrähten mit 100 A limitiert [52]. Durch den Fahrtwind im Betrieb verbessert sich die Kühlung des Stromabnehmers. Daher ist im Stillstand mit längeren Ladezeiten zu rechnen [4].

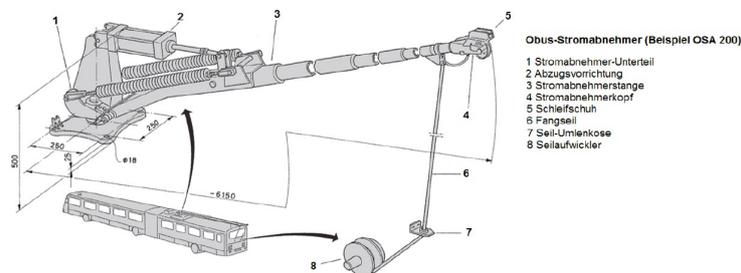


Abb. 22: Systemskizze Stromstangen und Stromabnehmer
Quelle: [90]

Um den Ladevorgang eines akkubetriebenen Trolleybusses mit Streckenladung näher zu erläutern, beziehen sich die folgenden Ausführungen auf das sogenannte *IMC500* System der Firma *Kiepe-Electric*. In Abbildung 8 bis Abbildung 11 ist die Ladetechnologie anhand von Skizzen dargestellt. Die Bezeichnung *IMC500* bedeutet *In-Motion-Charging* mit 500 kW Leistung. Im Oberleitungsbetrieb können sowohl zwei Motoren mit bis zu 320 kW betrieben und die Akkus mit 200-300 kW geladen werden. Darüber hinaus kann die Klimaanlage oder die Heizung mit rund 40 kW direkt von den Fahrdrähten gespeist werden, um die Akkus zu schonen. Damit der Betrieb und der Ladevorgang möglichst effizient abläuft, wird die zugeführte Energie über ein Energiemanagement-System überwacht. Der Akku im Fahrzeug kann fehlende Energie aus der Oberleitung ausgleichen, denn dieser wird nur jene Energie entnommen, die tatsächlich von den Unterwerken zur Verfügung gestellt werden kann [34]. Ein wichtiges Bestandteil des gesamten Energiemanagement-Systems ist das *Battery-Management-System*, kurz BMS. Es dient der Überwachung des Akkus, um einen sicheren Ladevorgang und Betrieb zu gewährleisten. Das

BMS kontrolliert laufend jede einzelne Zelle der Akkumodule mit dem Ziel, jede Zelle gleichmäßig zu belasten. Ansonsten würde jene Zelle, mit der geringsten Ladung, die Leistungsfähigkeit des gesamten Akkumoduls bestimmen [32, S. 79]. Die Aufgaben des BMS umfassen noch viele weitere Punkte, wie [32, S. 80]:

- Ladekontrolle,
- Zellschutz,
- Lastmanagement,
- Bestimmung des Ladezustandes (englisch State of Charge bzw. SoC),
- Ausbalancieren der Zellen,
- Kommunikation,
- Historie und
- Thermomanagement.

Der Hersteller *Kiepe-Electric* bietet zudem das *Smart Fleet-Charging-Management* System an, das über künstliche Intelligenz Daten der einzelnen akkubetriebenen Trolleybusse sammelt, mit dem Ziel die Busflotte energietechnisch so effizient und akkuschonend wie möglich zu leiten. Dazu zählt das Erlernen der Strecken, Dokumentieren der Ladezeiten und Verbräuche oder das Priorisieren von Ladevorgängen einzelner Busse der Flotte um eine hohe Betriebssicherheit sicherzustellen [36]. Eine derartige selbstlernende Überwachung der Flotte wird etwa in Salzburg für die eObusse eingesetzt [51].

Abseits der Fahrdrähte werden alle Verbraucher von Motoren bis zur Beleuchtung oder der Klimaanlage über den Akku mit Energie versorgt, ohne dass der Fahrgast einen Unterschied wahrnimmt. Im Notfahrt-Modus ist eine bedeutend größere Reichweite möglich, da nur die notwendigsten Nebenverbraucher, wie die Außenbeleuchtung des Busses, versorgt werden. Um die Reichweite von Linienverlängerung zu Vergrößern, kann die Wendezeit an der Endhaltestelle zum Nachladen der Akkus im Stand genutzt werden.

3.5 Ladestrategien und Einfluss auf den Betrieb

Der Begriff *Streckenladung* bedeutet im Zusammenhang mit akkubetriebenen Trolleybussen, dass der Akku während der Fahrt geladen werden kann. Für akkubetriebene Busse im Allgemeinen gibt es verschiedene Möglichkeiten den Akku zu laden bzw. den Bus mit Strom zu versorgen. Um einen Überblick zu schaffen, werden die Methoden im folgenden kurz zusammengefasst (nach [86]).

In Motion Feeding¹⁶

Reguläre Trolleybusse ohne Traktionsakku sind auf die Oberleitung als Stromquelle angewiesen. Diese Fahrzeuge sind an die Infrastruktur gebunden und können sich abseits des Schwenkbereichs der Stromstangen nicht bewegen.

In Motion Charging bzw. Streckenladung

Akkubetriebene Trolleybusse mit Streckenladung sind in der Lage das Oberleitungsnetzwerk zu verlassen, da der Akku die Energieversorgung abschnittsweise übernehmen kann. Nachdem eine Strecke im Akkubetrieb zurückgelegt worden ist, schließt sich der Bus wieder an der Oberleitung an, um den Akku während der Fahrt aufzuladen. Infolgedessen ist ein Betrieb ohne Stillstand möglich. Da keine Stehzeit zum Laden notwendig ist, hat diese Ladestrategie den mit Abstand geringsten Einfluss auf den Betrieb einer Linie.

¹⁶*In Motion Feeding* beschreibt keine Ladestrategie in diesem Sinne und ist nur zur Vollständigkeit in der Aufzählung angeführt.

Flash Charging

Das *Flash Charging* beschreibt das Nachladen an Haltestellen im Zeitraum von 10-15 Sekunden. Für den durchgängigen Betrieb einer Buslinie ist die Ladestrategie nicht ausreichend. Zum Beispiel wird das *Flash Charging* an 13 der 50 Stationen für die Linie 23 in Genf (Schweiz) in Kombination mit *Opportunity Charging* und *Overnight Charging* verwendet [1].

Opportunity Charging bzw. Gelegenheitsladung

Wenn die Akkus zwischen den Schichten oder an (End)Haltestellen der Buslinien aufgeladen werden, spricht man von *Opportunity Charging*. Diese Möglichkeit des Aufladens lässt sich besonders gut mit *In Motion Charging* kombinieren. Somit kann die Wendezeit an den Endstationen effizient genutzt werden und erweitert den möglichen Einsatzradius für Linienverlängerungen von akkubetriebenen Trolleybussen mit Streckenladung. Gerade beim Nachladen während Wendezeiten an Endhaltestellen müssen eventuelle Verspätungen, die die Ladezeit verkürzen, einkalkuliert werden und können keineswegs als konstant angenommen werden [52].

Overnight Charging bzw. Nachtladung

Für Busse, die nicht durchgehend in Betrieb sein müssen, eignet sich das Aufladen der Akkus im Busdepot über Nacht. Diese Art des Wiederaufladens der Traktionsakkus erfordert einen deutlich größeren Akku, als es bei akkubetriebenen Trolleybussen mit Streckenladung der Fall ist (vgl. Abbildung 23). Der Energiespeicher muss über eine ausreichend große Kapazität verfügen, um über die geplante Betriebszeit einsatzfähig zu sein.

Wie aus der obigen Aufzählung ersichtlich ist, hat die Streckenladung (In Motion Charging) den geringsten, im Idealfall gar keinen, Einfluss auf den Betrieb einer Buslinie. Besonders interessant ist die Kombination aus Streckenladung und Opportunity Charging, da auf diese Weise die Vorteile beider Ladestrategien verbunden werden können, um längere Linienerweiterungen zu ermöglichen. Wirtschaftlich betrachtet, kann es je nach den Randbedingungen günstiger sein, die Investitionskosten für eine Oberleitung in Kauf zu nehmen, um somit die Anzahl der benötigten Fahrzeuge und Busfahrer zu reduzieren. Vielerorts werden Kombinationen der verschiedenen Ladestrategien verwendet, um einen reibungslosen Betrieb des Busnetzes sicherzustellen. Welche Strategie die beste ist, hängt etwa von den Anforderungen des Busbetreibers und von den Randbedingungen des Einsatzgebietes wie die Topografie, Klima oder der vorhandenen Infrastruktur ab. Umso wichtiger ist es daher, im Vorhinein eine genaue Analyse der geplanten Strecke durchzuführen. Abbildung 23 zeigt inwiefern sich die Ladestrategie auf die erforderliche Akkukapazität auswirkt. In der Abbildung wird eine 10 km lange Strecke analysiert, die bei *Terminus 1* startet und bei *Terminus 2* endet. Es wird sowohl die Hin- als auch die Rückfahrt betrachtet, weshalb die Gesamtstrecke 20 km beträgt. Ausgehend von der Anforderung einer maximalen Entladung von 50 % der Kapazität, benötigt ein regulärer Elektrobus für eine Strecke von 20 km einen Akku mit 120 kWh. Mit dem System der akkubetriebenen Trolleybusse mit Streckenladung kann durch Anordnung von Oberleitungen auf einer Länge von 3 km (entspricht 30 % der Gesamtstrecke) die Akkukapazität auf 84 kWh reduziert werden. Eine den Anforderungen angepasste Anordnung der Oberleitungen mit der gleichen Gesamtlänge von 3 km, aber aufgeteilt auf zwei Sektionen mit 2 km und 1 km Länge, verkleinert die Größe der Traktionsakkus auf 30 kWh [5].

Ein weiterer wichtiger Punkt im Vergleich der Ladestrategien, ist die Nutzung der Ladeinfrastruktur laut Abbildung 24. Speziell mit Overnight Charging wird diese nur zu rund 19 % pro Tag genutzt. Zudem ist zu den Ladezeiten der Leistungsbedarf über wenige Stunden sehr hoch. Der Platzverbrauch im Depot für das Aufladen einer gesamten Busflotte über Nacht ist ebenso zu berücksichtigen. Eine Verbesserung bezüglich der Nutzung und der Verteilung des Leistungsbedarfs stellt das Opportunity Charging dar. Die beste und effizienteste Lösung, die den Leistungsbedarf nahezu über den gesamten Tag gleichmäßig verteilt, ist die Streckenladung [87]. Nachdem jede Art von Ladevorgang mit Verlusten verbunden ist, entspricht die in einem Akku eingebrachte Energie nicht der schlussendlich im Akku gespeicherten und nutzbaren Energie. Bei

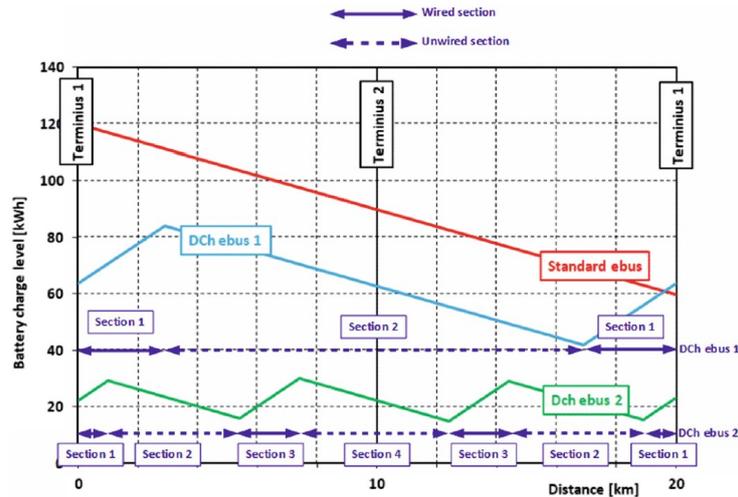


Abb. 23: Vergleich verschiedener Ladestrategien
Quelle: [5, S. 300, Fig. 5]

Lithium-Ionen-Akkus beträgt bei regulären Ladevorgängen der Energieverlust rund 10-20 %. Die Verluste wirken sich bei Schnellladevorgängen umso größer aus [70]. Im Allgemeinen kann der Ladeverlust nur durch Systeme mit *In Motion Feeding* vermieden werden, da der Ladevorgang entfällt.

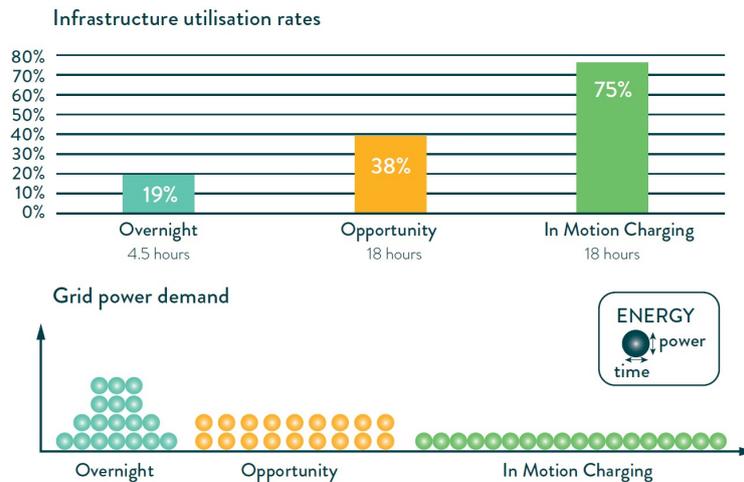


Abb. 24: Vergleich der Infrastruktur-Nutzung und dem Infrastruktur-Leistungsbedarf
Quelle: [87, S. 4]

4 Anwendung auf das Busnetz in Linz

Die beiden letzten verbleibenden Städte in Österreich mit Oberleitungsbus-Linien sind Salzburg und Linz. In Salzburg wurde bereits eine Linienverlängerung mit akkubetriebenen Trolleybussen mit Streckenladung mit der Linie 5 zur Untersbergbahn nach Grödig realisiert. Das Busnetzwerk in Linz wurde im Jahr 1944 eröffnet und versorgt heute die Landeshauptstadt mit einer Netzlänge von 18,70 km und mit einer Linienlänge von 28,32 km [85]. Aufgrund der bestehenden Infrastruktur sind Linienenerweiterungen in Linz möglich. Aktuell verkehren die vier Oberleitungsbus-Linien 41, 43, 45 und 46 laut Abbildung 25. Neben den ohnehin elektrischen Oberleitungsbusen werden auf den restlichen Buslinien seit 2012 umweltfreundliche Gasbusse anstatt von Dieselnissen

den geplanten Linien 47 und 48 an. Anhand der Streckenführung in Abbildung 27 ist ersichtlich, dass sich die beiden Linien den Hauptteil der Strecke teilen. Die ersten beiden Abschnitte 1a und 1b sowie der Abschnitt 5 der neuen Linien scheinen im Akkubetrieb möglich zu sein. Speziell die Streckenführung ab der neuen Donaubrücke, entlang der ehemaligen Linzer Verbindungsbahn bis zur Derfflingerstraße (Abschnitt 2), bietet sich für die Errichtung von Oberleitungen an. Die bestehende Oberleitung im Abschnitt 3 der Linie 45 und 45a kann ebenfalls zum Nachladen genutzt werden. Es folgt Abschnitt 4, der je nach Anforderungen nicht entlang der gesamten Teilstrecke mit Oberleitungen versorgt werden muss. Denn grundsätzlich wäre eine abwechselnde Folge von akkubetriebenen und oberleitungsbetriebenen Streckenabschnitten die Lösung, die zur geringsten Akkukapazität führt (vgl. Abbildung 23). Gegenwärtig ist der Bau von 7-8 km Oberleitungen geplant, da die gesamte Strecke der Linien 47 und 48 mit Fahrdrähten versorgt werden soll [84]. Mit dem System der akkubetriebenen Trolleybusse unter Nutzung der Streckenladung wären nur 3,55 km an zusätzlichen Oberleitungen zum bestehenden Abschnitt 3 mit 0,90 km Länge erforderlich. In Summe würde diese Lösung die Linie 47 mit einer Gesamtlänge von 8,51 km die Oberleitungsstrecke von 4,45 km zum Nachladen der Traktionsakkus nutzen. Für die Linie 48 beträgt die Gesamtlänge 7,89 km und die Strecke unter Fahrdrähten ebenfalls 4,45 km. Bezogen auf die längere Linie 48 könnten 53 % der Strecke für die Streckenladung genutzt werden. Bereits umgesetzte Projekte, beispielsweise die Linie 695 in Solingen, zeigen, dass Oberleitungen auf 22 % der Strecke bei ausreichender Fahrzeit unter Oberleitung ausreichen können. Daher kann die notwendige Fahrleitung mit großer Sicherheit durch präzise Planung und Simulation noch deutlich reduziert werden. Etwa die flache Topografie entlang der geplanten Linien 47 und 48 könnte ein Grund für eine Reduktion sein. Dennoch haben Steigungen, wenn diese auch kurz bzw. mit einer geringen Höhendifferenz ausfallen, einen bedeutenden Einfluss¹⁷ auf die Größe des Traktionsakkus [24]. Abbildung 26 zeigt das Höhenprofil entlang der Strecke von Abschnitt 2 bis 5. Der tiefste Punkt liegt auf 256 m über Adria und der höchste Punkt auf 270 m über Adria. Im Zuge der weiteren Ausarbeitung des Lösungsvorschlags gilt es zu evaluieren, ob beispielsweise der Anstieg mit 4,5 % Steigung, der in Abbildung 26 hervorgehoben ist, einen großen Einfluss auf die erforderliche Akkukapazität hat. Unter der Annahme, dass analog zu den eObussen in Salzburg (vgl. Tabelle 2), die Fahrzeit prozentual annäherungsweise der Fahrstrecke unter Oberleitung entspricht, scheint der Lösungsvorschlag eine realistische Möglichkeit zu sein. Ausgehend von den in Tabelle 6 berechneten Reichweiten, würde für die Abschnitte 1a, 1b und 5 vermutlich ein Energiespeicher mit einer Kapazität von 20 kWh ausreichen.

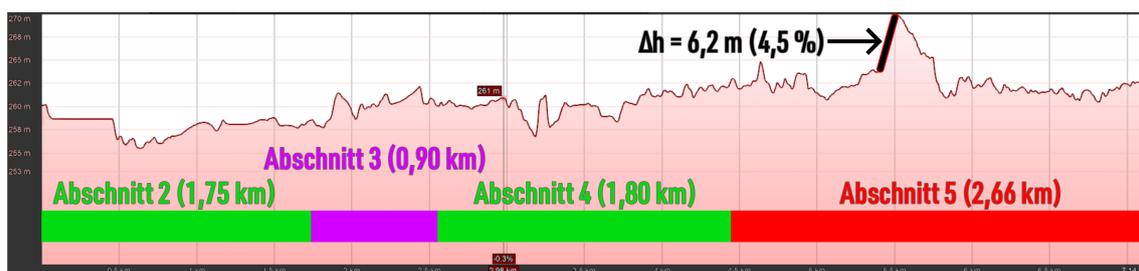


Abb. 26: Darstellung der Steigungen entlang Abschnitt 2 bis 5
Quelle: eigene Darstellung mit Daten aus Google Earth

¹⁷In [24] ist ein anschauliches Rechenbeispiel zum Verbrauch von akkubetriebenen Trolleybussen mit Streckenladungen auf Abschnitten mit Steigungen zu finden.

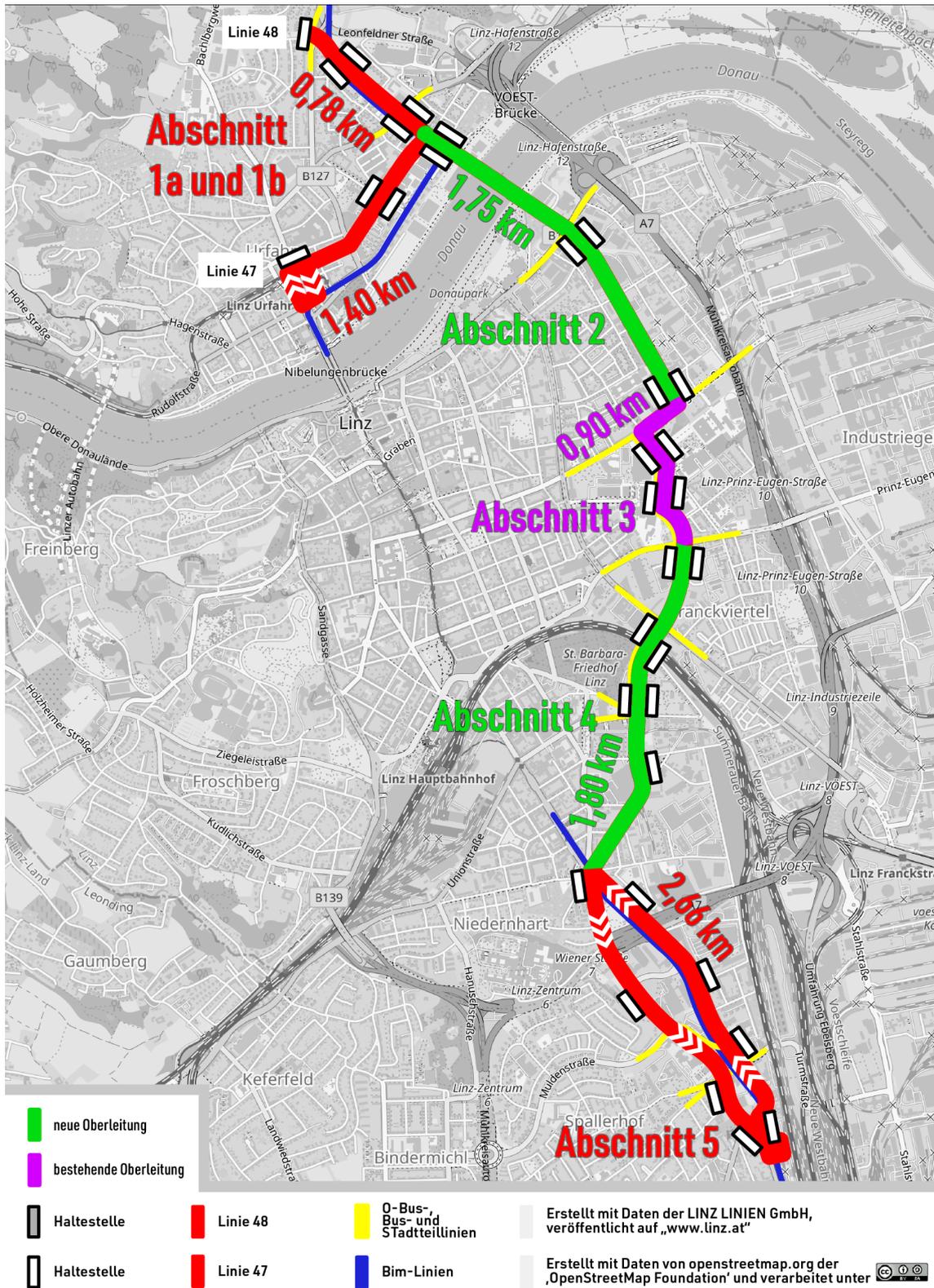


Abb. 27: Neue Obuslinien 47 und 48
 Quelle: [45] [46] bearbeitet

5 Schlussfolgerung

Zusammenfassend sind akkubetriebene Trolleybusse mit Streckenladung eine sinnvolle Weiterentwicklung der regulären Oberleitungsbusse und versuchen die Lücke zu Elektro- bzw. Dieselnissen mithilfe von Akkus zu schließen. Speziell für Städte mit bestehender Oberleitungsinfrastruktur sind kostengünstige sowie leistungsfähige Linienverlängerungen möglich. Da die Möglichkeit besteht, Linien auf einer Strecke, die etwa einem Drittel der Gesamtfahrzeit entspricht, mit Fahrdrähten auszurüsten, reduzieren sich die anfänglichen Investitionskosten im Vergleich zu Oberleitungsbussen enorm. Der Aufbau auf das seit Jahren erfolgreich eingesetzte System der Oberleitungsbusse, verhilft zu großer Zuverlässigkeit im Betrieb.

Im Wesentlichen gelingt es dem System, die Vorteile von Oberleitungsbussen und Elektrobussen zu verbinden, um eine nachhaltige, umweltschonende und leise Lösung für den innerstädtischen Nahverkehr bei hoher Frequenz anzubieten.

Die maximale Reichweite bei Linienverlängerungen mit akkubetriebenen Trolleybussen mit Streckenladung befindet sich nach aktuellem Stand der Technik mit einem 100 kWh großem Lithium-Ionen-Akku im Idealfall bei rund 33 km. Momentan kommen Akkus zwischen 20-100 kWh zum Einsatz womit je nach Topografie und Klimabedingungen mit Reichweiten von 10-30 km gerechnet werden kann.

Die größte Unbekannte ist jedoch, wie bei vielen anderen Elektrofahrzeugen auch, die Frage nach der Dauerhaftigkeit der Energiespeicher, die aufgrund der kurzen Erprobungszeit noch nicht ausreichend erforscht ist.

Akkubetriebenen Trolleybusse mit Streckenladung werden in zahlreichen Städten rund um die Welt eingesetzt und haben großes Potenzial als klimafreundliche Alternative zu den mit fossilen Brennstoffen betriebenen Stadtbussen. Allerdings bedarf es bei der Planung des Systems einer genauen Analyse der geplanten Strecke sowie des Klimas, um eine dauerhafte und zuverlässige Linienführung zu gewährleisten. Bereits zu Beginn der Planung einer neuen Oberleitungsbuslinie bietet es sich an, den Einsatz eines akkubetriebenen Trolleybusses mit Streckenladung zu prüfen, um die notwendigen Fahrdrähte zu minimieren und die Kosten für die elektrische Infrastruktur zu reduzieren.

Abbildungsverzeichnis

1	Van Hool Exqui.City 24 T Doppelgelenk-Trolleybus im Einsatz in Linz	3
2	Van Hool Exqui.City 24 T Doppelgelenk-Trolleybus Seitenansicht	4
3	Systemskizze eines regulären Oberleitungsbusses	4
4	Abmessungen eines Standard-Oberleitungsbusses sowie Darstellung der Oberleitungen (Skoda 9-Tr)	5
5	Portalachse eines Mercedes-Unimogs	5
6	Elektromote von Werner Siemens auf der Teststrecke in Berlin	8
7	Obus-Motorwagen W 76.395 in den 50er Jahren	8
8	IMC 500 Ladetechnologie 1	9
9	IMC 500 Ladetechnologie 2	9
10	IMC 500 Ladetechnologie 3	10
11	IMC 500 Ladetechnologie 4	10
12	Systemskizze eines akkubetriebenen Trolleybusses	10
13	Stadtplätze bleiben frei von Oberleitungen	12
14	Akkubetriebene Trolleybusse mit Streckenladung im Vergleich zu Elektrobussen .	13
15	Fahrspur der BRT-Linie 71 in Shanghai	14
16	Übersicht Gesamtsystem akkubetriebener Trolleybusse mit Streckenladung	17
17	Durchschnittlicher Verbrauch der eObusse in Salzburg für verschiedene Zeiträume	19
18	Übersicht derzeit verfügbarer Energiespeicher	22
19	Übersicht aktueller Energiespeicher	25
20	Ragone Plot verschiedener Energiespeicher	25
21	Anlegehilfe (Funnels) in transparenter Ausführung	27
22	Systemskizze Stromstangen und Stromabnehmer	27
23	Vergleich verschiedener Ladestrategien	30
24	Vergleich der Infrastruktur-Nutzung und dem Infrastruktur-Leistungsbedarf . . .	30
25	Plan der Oberleitungsbusse in Linz inklusive Betriebsstrecken	31
26	Darstellung der Steigungen entlang Abschnitt 2 bis 5	32
27	Neue Obuslinien 47 und 48	33

Tabellenverzeichnis

1	Übersicht eObus Salzburg (Österreich) nach [13], [7],[51], [28], [52]	15
2	Vergleich der Streckenabschnitte des eObus Salzburg unter Oberleitung und akkubetrieben im Normalbetrieb	18
3	Energieverbrauch nach Fahrzeuggröße	19
4	Jahresenergieverbrauch für Heizung eines Gelenkbusses mit einer täglichen Betriebsdauer von 18 Stunden in Deutschland	19
5	Potenzielle Reichweiten 60 kWh Lithium-Ionen-Akku	20
6	Potenzielle Reichweiten 20 kWh Lithium-Ionen-Akku	21
7	Potenzielle Reichweiten 100 kWh Lithium-Ionen-Akku	21
8	Vor- und Nachteile aktueller Energiespeicher	23
9	Fazit aktueller Energiespeicher	24
10	Übersicht über bestehende akkubetriebene Trolleybus-Netze mit Streckenlandung	44

Literatur

- [1] ABB Asea Brown Boveri Ltd. *ABB flash-charging eBus solution reaches a new milestone of half a million km*. 2019. URL: <https://new.abb.com/news/detail/17282/abb-flash-charging-ebus-solution-reaches-a-new-milestone-of-half-a-million-km> (Zugriff am 28. 01. 2022).
- [2] AUTOBUS Web. „Metromare di Rimini, il Brt a zero emissioni al via definitivo (con i filobus Van Hool)“. In: *AUTOBUS Web* (2021). URL: <https://www.autobusweb.com/metromare-rimini-via-definitivo-filobus/> (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [3] W. Backhaus, H. Günter und trolley:motion. „trolley:2.0 for smart cities“. In: *Final project brochure Results* (2021). URL: https://www.trolleymotion.eu/wp-admin/admin-ajax.php?action=outofthebox-download&OutOfTheBoxpath=%2FEU%20project%20_trolley%202.0%20project%20eme%2Ftrolley%202.0%20finalbrochure%20may2021.pdf&lastpath=%2FEU%20project%20_trolley%202.0%20project%20EME&account_id=dbid:AAC5gybBWOHACkoOzBVWSJ_CpKzN20KM9cs&listtoken=ce6512b93f1eff2cfe66ee2b0e512c13&d1=1 (Zugriff am 21. 12. 2021).
- [4] M. Bartłomiejczyk. „Practical application of in motion charging: Trolleybuses service on bus lines“. In: *2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. 2017, S. 1–6. DOI: 10.1109/EPE.2017.7967239.
- [5] M. Bartłomiejczyk und M. Połom. „Dynamic Charging of Electric Buses as a Way to Reduce Investment Risks of Urban Transport System Electrification“. en. In: *TRANSBALTICA XI: Transportation Science and Technology*. Hrsg. von K. Gopalakrishnan, O. Prentkovskis, I. Jackiva und R. Junevičius. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 297–308. ISBN: 978-3-030-38666-5. DOI: 10.1007/978-3-030-38666-5_32.
- [6] M. Bartłomiejczyk, V. Stýskala, R. Hrbac und M. Połom. „Trolleybus with traction batteries for autonomous running“. In: Sep. 2013.
- [7] M. Baumeister, E. Claus, T. Diebel, F. Laurent, N. Nakkash und J. Nolte. *Alternative Antriebe im öffentlichen Verkehr*. Forschungsber. KCW GmbH, 2021. 161 S.
- [8] F. Bergk und U. Lambrecht. *Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV*. Forschungsber. Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2015. 87 S.
- [9] F. Bergk, U. Lambrecht, R. Pütz und H. Landinger. *Analyse der Lebenszykluskosten von Hybrid-Oberleitungsbussen*. 2015. URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/mks-fachworkshop-hybrid-oberleitungsbusse-diskussionsgrundlage.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff am 24. 12. 2021).
- [10] Bundesministerium für Digitales und Verkehr. „Der Hybrid-Oberleitungsbus – wirtschaftliche Möglichkeiten und ästhetische Herausforderungen für die Elektrifizierung des städtischen Busverkehrs - Dokumentation I“. In: (2015). URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/mks-fachworkshop-hybrid-oberleitungsbusse-dokumentation.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff am 23. 12. 2021).
- [11] Bundesministerium für Digitales und Verkehr. „Der Hybrid-Oberleitungsbus – wirtschaftliche Möglichkeiten und ästhetische Herausforderungen für die Elektrifizierung des städtischen Busverkehrs - Dokumentation II“. In: (2015). URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/MKS/mks-fachworkshop-hybrid-oberleitungsbusse-dokumentation-zwei.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff am 23. 12. 2021).

- [12] Bundesverband Elektromobilität Österreich (BEÖ). *E-Mobilität in Zahlen*. 2021. URL: <https://www.beoe.at/statistik/> (Zugriff am 16. 12. 2021).
- [13] Carrosserie HESS AG. *Alle 15 lighTram® 19 DC im Einsatz*. 2020. URL: https://www.hess-ag.ch/fileadmin/user_upload/Hess/Bus/lighTram/lighTram19/Flyer_lighTram/Flyer_lighTram_19_DC_Salzburg_DE_Web.pdf (Zugriff am 28. 12. 2021).
- [14] Á. Costa und R. Fernandes. „Urban public transport in Europe: Technology diffusion and market organisation“. eng. In: *Transportation research. Part A, Policy and practice* 46.2 (2012), S. 269–284. ISSN: 0965-8564.
- [15] Dokumentationszentrum für Europäische Eisenbahnforschung. *DEEF-Blog 2017: Linz Linien: Längster Obus Österreich*. 2017. URL: https://www.dokumentationszentrum-eisenbahnforschung.org/blog/deefblog2017_linzlinien_vanhool24mobus.htm (Zugriff am 14. 12. 2021).
- [16] Duden online. *Wörterbuch*. 2021. URL: <https://www.duden.de/node/185639/revision/520723> (Zugriff am 14. 12. 2021).
- [EisbG] *Bundesgesetz über Eisenbahnen, Schienenfahrzeuge auf Eisenbahnen und den Verkehr auf Eisenbahnen*. BGBl. Nr. 60/1957. 1957.
- [17] EV Database. *O-Bus*. 2019. URL: <https://www.geschichte.wien.gv.at/0-Bus> (Zugriff am 17. 12. 2021).
- [18] EV Database. *Tesla Model 3*. 2021. URL: <https://ev-database.de/pkw/1555/Tesla-Model-3> (Zugriff am 16. 12. 2021).
- [19] Far East BRT Planning Co., Limited. *BRT Linie 71 Shanghai*. 2022. URL: <https://photos.fareast.mobi/photo?id=14810&c=20> (Zugriff am 02. 02. 2022).
- [20] Ž. Filipović. „Sonder- und Strassenfahrzeuge“. ger. In: *Elektrische Bahnen*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, S. 247–254. ISBN: 3642452264.
- [21] Fraunhofer IAO, Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg und e-mobil BW GmbH. *STRUKTURSTUDIE BWe MOBIL 2011 – Baden-Württemberg auf dem Weg in die Elektromobilität*. Forschungsber. 2011. 94 S. URL: <https://wrs.region-stuttgart.de/nc/aktuell/publikationen/artikel/strukturstudie-bwe-mobil-2011.html> (Zugriff am 25. 01. 2022).
- [22] Fraunhofer ISI, IFB Institut für Bahntechnik GmbH, PTV Transport Consult GmbH und TU Dresden – Professur für Elektrische Bahnen. *Machbarkeit eines Hybrid-oberleitungsbusbetriebs – „Berlin-Spandau“*. Forschungsber. BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie, 2019. 309 S. URL: <https://fragdenstaat.de/dokumente/3749/> (Zugriff am 28. 12. 2021).
- [23] S. Grava. *Urban transportation systems : choices for communities*. New York: McGraw-Hill, 2003. ISBN: 978-0071384179.
- [24] D. Grygar, M. Koháni, R. Štefún und P. Drgoňa. „Analysis of limiting factors of battery assisted trolleybuses“. In: *Transportation Research Procedia* 40 (2019). TRANSCOM 2019 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport, S. 229–235. ISSN: 2352-1465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.035>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146519301966>.
- [25] E. Gstöttner. *Nach wie vor kein Geld für verlängerte Obus-Linie*. 2016. URL: <https://www.nachrichten.at/oberoesterreich/linz/Nach-wie-vor-kein-Geld-fuer-verlaengerte-Obus-Linie;art66,2176156> (Zugriff am 29. 01. 2022).

- [26] S. Hammer, A. Stephan, D. Steiner und G. Wundratsch. *Stand und Entwicklungstendenzen bei elektrisch betriebenen Linienbussen*. Forschungsber. trolley:motion, 2017. 100 S. URL: <https://www.trolleyemotion.eu/white-paper-stand-und-entwicklungstendenzen-bei-elektrisch-betriebenen-linienbussen/> (Zugriff am 24. 01. 2022).
- [27] M. Hilgers. „Achsen“. ger. In: *Chassis und Achsen*. Nutzfahrzeugtechnik lernen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 33–43. ISBN: 3658127465.
- [28] H. Hondius. „E-Mobilität: Welche Rolle kann der Trolleybus spielen?“ In: *Der Nahverkehr* 6 (2018), S. 54–63. URL: <https://www.trolleyemotion.eu/wp-content/uploads/2019/03/Beitrag-HondiusDNV6-2018Trolleybusse.pdf> (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [29] International Transport Workers’ Federation. *Schnellbussysteme (Bus Rapid Transit - BRT)*. 2021. URL: <https://www.itfglobal.org/de/sector/urban-transport/schnellbussysteme-bus-rapid-transit---brt> (Zugriff am 21. 12. 2021).
- [30] INTERREG Deutschland Nederland. *TROLLEYBUS 2.0 FÄHRT JETZT IN ARNHEM*. 2019. URL: <https://www.deutschland-nederland.eu/trolleybus-2-0-faehrt-jetzt-in-arnhem/> (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [31] J. Jirát. „Umweltfreundlich, stark und leise bergaufwärts“. In: *WOZ Die Wochenzeitung* 41 (2010). URL: <https://www.woz.ch/1041/trolleybusse/umweltfreundlich-stark-und-leise-bergaufwaerts> (Zugriff am 14. 12. 2021).
- [32] A. Karle. *Elektromobilität : Grundlagen und Praxis*. ger. 5., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser, 2021. ISBN: 3446468617. URL: 10.3139/9783446468610.
- [KFG] *Bundesgesetz vom 23. Juni 1967 über das Kraftfahrwesen*. BGBl. Nr. 267/1967. 1967.
- [33] R. Kiebler. *Der Obus - ein besonderes Nahverkehrsmittel*. 2021. URL: <http://www.obuses.de/Der%20Oberleitungsbus.htm> (Zugriff am 05. 01. 2022).
- [34] Kiepe-Electric. *IMC500 / E-BUS MIT IN MOTION CHARGING (IMC®)*. 2021. URL: <https://kiepe.knorr-bremse.com/de/de/busse-und-e-mobilitaet/e-systeme/imc500-e-bus-mit-in-motion-charging-imc/> (Zugriff am 18. 12. 2021).
- [35] Kiepe-Electric. *In Motion Charging-Kiepe Electric IMC 500*. 2019. URL: https://www.youtube.com/watch?v=0VYn77zFf_c (Zugriff am 18. 12. 2021).
- [36] Kiepe-Electric. *SMART FLEET-CHARGING MANAGEMENT (SFM) FÜR OPTIMALES ENERGIEMANAGEMENT*. 2021. URL: <https://kiepe.knorr-bremse.com/de/de/busse-und-e-mobilitaet/digitale-loesungen/smart-fleet-charging-management-sfm/> (Zugriff am 27. 01. 2022).
- [37] S. Klausner, C. Jehle, C. Söffker, R. Hofsädtler und J. Thiede. „Energieversorgung für Bahn und Bus“. In: *Der Nahverkehr* 1+2 (2018), S. 46–52. URL: https://www.guwplus.de/images/Publikationen/DNV_2018_GUW.pdf (Zugriff am 26. 01. 2022).
- [38] Knorr-Bremse AG. *EWIG JUNG: DER OBERLEITUNGSBUS ALS UMWELTGERECHTE NAHVERKEHRSLösUNG*. 2019. URL: <https://www.knorr-bremse.com/de/magazin/ewig-jung-der-oberleitungsbus-als-umweltgerechte-nahverkehrsloesung.json> (Zugriff am 14. 12. 2021).
- [39] Knorr-Bremse AG. *IMC500 Doppelgelenk-Trolleybus*. 2019. URL: https://www.knorr-bremse.com/media/5000_magazin/2019/maerz/oberleitungsbusse/e-bus-kiepeausstattung_16x9_1920w.jpg (Zugriff am 14. 12. 2021).
- [40] Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V. *Leistungsdichte*. 2022. URL: <https://www.batterieforum-deutschland.de/infoportal/lexikon/leistungsdichte/> (Zugriff am 04. 03. 2022).

- [41] LibroDuct GmbH und Co. KG. *DIaLOGIKa - Trolleybus automatically reconnecting with overhead wires after branch*. 2018. URL: <https://www.libroduct.com/> (Zugriff am 23. 12. 2021).
- [42] LINZ AG für Energie, Telekommunikation, Verkehr und Kommunale Dienste. *Der Van Hool Exqui.City Design Linz*. 2019. URL: https://www.linzag.at/media/dokumente/linien_1/infomaterial_1/B_ExquiCity24-Datenblatt.pdf (Zugriff am 23. 12. 2021).
- [43] LINZ AG für Energie, Telekommunikation, Verkehr und Kommunale Dienste. *Die neue Autobus-Generation der LINZ AG LINIEN „wächst heran“*. 2020. URL: https://www.linzag.at/media/dokumente/presse_2/linz_ag_linien_6/Die_neuen_Autobusse_fuer_Linz.pdf (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [44] LINZ AG für Energie, Telekommunikation, Verkehr und Kommunale Dienste. *Erfahren Sie die LINZ AG LINIEN*. 2018. URL: https://www.linzag.at/media/dokumente/infomaterial_2/imagefolder-linzag-linien.pdf (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [45] LinzWiki. *Plan der Linie 47*. 2021. URL: https://www.linzwiki.at/wiki/Datei:180121-planung_linie47.png/ (Zugriff am 31. 01. 2022).
- [46] LinzWiki. *Plan der Linie 48*. 2021. URL: https://www.linzwiki.at/wiki/Datei:180121-planung_linie48.png/ (Zugriff am 31. 01. 2022).
- [47] LinzWiki. *Plan der Verlängerung der Linie 41*. 2021. URL: https://www.linzwiki.at/wiki/Datei:180121-verlaengerung_linie41.png/ (Zugriff am 02. 02. 2022).
- [48] Mag. Alfred Luft. *Obus-Motorwagen W 76.395*. 1950. URL: <https://traminator.at/rueckblicke/oberleitungsbusse-in-wien/> (Zugriff am 17. 12. 2021).
- [49] Magistrat der Landeshauptstadt Linz. *Nahverkehrsinitiative für die Stadt Linz*. 2020. URL: https://www.linz.at/medienservice/2020/202009_107426.php (Zugriff am 29. 01. 2022).
- [50] P. Martin, B. Franz, F. Karl und B. Ulrich. *Fahrzeugakustik*. ger. Der Fahrzeugantrieb. Vienna: Springer-Verlag Vienna, 2010. ISBN: 321176741X. URL: 10.1007/978-3-211-76741-2.
- [51] NOW GmbH. *eObus im Praxiseinsatz: Dekarbonisierung nach einem Jahr Praxis – Osterer (Salzburg AG)*. 2021. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=J-JV5nWw82A> (Zugriff am 28. 12. 2021).
- [52] C. Osterer und P. Brandl. „eObus: Dekarbonisierung nach einem Jahr Praxis“. In: *Der Nahverkehr* 3 (2021), S. 42–47. URL: https://jimdo-storage.global.ssl.fastly.net/file/e9ec5bbb-00ac-4a54-98fa-ddb5a17208af/NAHVERKEHR_2021_003-eobus.pdf (Zugriff am 22. 01. 2022).
- [53] M. A. Populorum. *Das kleine Verkehrslexikon : das aktuelle Nachschlagewerk zum Thema Mobilität und Verkehr : über 2400 Einträge Schiene, Straße, Wasser, Luft, Weltraum*. ger. Grödig: Mercurius Verlag, 2020. ISBN: 3903132209.
- [54] W. Reinhardt. *Öffentlicher Personennahverkehr: Technik – rechts- und betriebswirtschaftliche Grundlagen*. ger. 2. Aufl. 2018. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 3658220589.
- [55] A. Ritter, P. Elbert und C. Onder. „Energy Saving Potential of a Battery-Assisted Fleet of Trolley Buses**This project is a collaboration with the industrial partners Car-rosserie HESS AG and Verkehrsbetriebe Zurich (VBZ). It is financially supported by the Swiss Federal Office of Energy (SFOE).“ In: *IFAC-PapersOnLine* 49.11 (2016). 8th IFAC Symposium on Advances in Automotive Control AAC 2016, S. 377–384. ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.08.056>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896316313969>.

- [56] M. Rogge, S. Wollny und D. U. Sauer. „Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport—A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements“. In: *Energies* 8.5 (2015), S. 4587–4606. ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en8054587. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/5/4587>.
- [57] Salzburg AG für Energie, Verkehr und Telekommunikation. *AB SOFORT SIND ALLE 15 EOBUSSE IM EINSATZ*. 2019. URL: <https://www.salzburg-ag.at/bus-bahn/aktuelle-meldungen/eobus.html> (Zugriff am 20. 12. 2021).
- [58] Salzburg AG für Energie, Verkehr und Telekommunikation. *Ein Tag mit der eObuslinie 5 - von der Schranne bis auf den Untersberg*. 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=LSfD0FfEgvc> (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [59] Salzburg AG für Energie, Verkehr und Telekommunikation. *eObus*. 2019. URL: <https://presse.salzburg-ag.at/news-obus-sonderfahrplan-zu-allerheiligen?id=95489&menueid=17306&l=deutsch> (Zugriff am 26. 12. 2021).
- [60] Salzburg AG für Energie, Verkehr und Telekommunikation. *ERSTE FAHRT MIT DEM NEUEN EOBUS*. 2019. URL: <https://presse.salzburg-ag.at/news-erste-fahrt-mit-dem-neuen-eobus?id=90824&menueid=17306> (Zugriff am 25. 01. 2022).
- [61] Siemens. *Elektromote Siemens*. 1882. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:51d4b442ae3ee066298538420f24c316b976bcff/width:1125/quality:high/0261-berlin-first-trolleybus-1882-a-289-1-web.jpg> (Zugriff am 15. 12. 2021).
- [62] Siemens Deutschland. *Mit Strom auf die Straße*. 2021. URL: <https://new.siemens.com/de/de/unternehmen/konzern/geschichte/stories.html> (Zugriff am 15. 12. 2021).
- [63] Solaris Bus and Coach sp. z o.o. *Erweiterung der Flotte der Stadtwerke Solingen um 16 emissionsfreie Trollino 12*. 2020. URL: <https://www.solarisbus.com/de/presse/erweiterung-der-flotte-der-stadtwerke-solingen-um-16-emissionsfreie-trollino-12-1399> (Zugriff am 20. 12. 2021).
- [64] Solaris Bus and Coach sp. z o.o. *Erweiterung der Flotte der Stadtwerke Solingen um 16 emissionsfreie Trollino 12*. 2020. URL: <https://www.solarisbus.com/de/presse/erweiterung-der-flotte-der-stadtwerke-solingen-um-16-emissionsfreie-trollino-12-1399> (Zugriff am 28. 12. 2021).
- [65] Stadt Zürich. *Hess Doppelgelenk-Trolleybus plus*. 2021. URL: https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die_vbz/fahrzeuge/trolleybusse/hess-doppelgelenk-trolleybus-plus.html (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [66] Stadt Zürich. *Hess SwissTrolley plus*. 2021. URL: https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/die_vbz/fahrzeuge/trolleybusse/hess-swisstrolley-plus.html (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [67] Stadt Zürich. *Trolleybus mit Energypack*. 2021. URL: <https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/mobilitaet-der-zukunft/elektromobilitaet/trolleybus/trolleybus-mit-energypack.html> (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [68] Stadtwerke Solingen GmbH Verkehrsbetriebe. *BOB – Der Bus*. 2021. URL: <https://www.bob-solingen.de/ueber-bob> (Zugriff am 28. 12. 2021).

- [69] U. States., S. Union. und T. nauchno-issledovatelskii i proektnyi institut po gradostroitelstvu Gosgrazhdanstroia (Soviet Union). *Transportation and the urban environment, traffic in the centers of large cities : a joint report of the U.S./U.S.S.R Urban Transportation Team under the Agreement on Cooperation in the Field of Environmental Protection / [U.S. Department of Housing and Urban Development, State Committee on Civil Engineering and Architecture of the U.S.S.R. (Gosstroy), Central Scientific Research and Design Institute on Urban Development (Gosgrazhdanstroy)]*. English. U.S. Dept. of Transportation, Office of the Secretary of Transportation Washington, D.C, 1981, 1 v. (various pagings) :
- [StrabVO] *Verordnung des Bundesministers für Wissenschaft und Verkehr über den Bau und den Betrieb von Straßenbahnen*. BGBl. II Nr. 76/2000. 1999.
- [StVO] *Bundesgesetz vom 6. Juli 1960, mit dem Vorschriften über die Straßenpolizei erlassen werden*. BGBl. Nr. 159/1960. 1960.
- [70] J. Sun. „Car battery efficiencies“. In: *Stanford University Course Work, Physics 240* (2010), S. 100.
- [71] Sustainable BUS. „ATM Milano and the renewal of the trolleybus fleets. The first Solaris Trollino IMC ‘lands’ in Milan“. In: *Sustainable BUS* (2019). URL: <https://www.sustainable-bus.com/trolleybus-tramway/atm-milano-and-the-renewal-of-the-trolleybus-fleets-the-first-solaris-trollino-imc-lands-in-milan/> (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [72] Sustainable BUS. *Electric bus range, focus on electricity consumption. A sum-up*. 2020. URL: <https://www.sustainable-bus.com/news/electric-bus-range-focus-on-electricity-consumption-a-sum-up/> (Zugriff am 25. 01. 2022).
- [73] SVE - Städtischer Verkehrsbetrieb Esslingen am Neckar. *Neue Elektro-Hybridbusse*. 2019. URL: <https://www.sve-es.de/start/aktuelles/solaris.html> (Zugriff am 28. 12. 2021).
- [74] A. Tews. „BOBs haben in Solingen die Linie 695 übernommen“. In: *Solinger Tagesblatt* (2019). URL: <https://www.solinger-tageblatt.de/solingen/bobs-haben-solingen-linie-uebernommen-13184455.html> (Zugriff am 28. 12. 2021).
- [75] tpg Transports publics genevois. *Plus accessible et confortable : l'Exqui.City, nouveau trolleybus des tpg, a été inauguré ce matin sur la ligne 3*. 2014. URL: https://www.tpg.ch/sites/default/files/2019-11/TPG_Communicu%C3%A9%20de%20presse_inauguration%20Exqui.City_.pdf (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [76] TransInfo.pl. „Gdynia kupi kolejnych 6 trolejbusów. Z Geparda“. In: *TransInfo.pl* (2018). URL: https://transinfo.pl/infobus/gdynia-kupi-kolejnych-6-trolejbusow-z-geparda-more_108904/ (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [77] TransportPubliczny. „Gdynia i Solaris podpisały umowę na 30 trolejbusów“. In: *TransportPubliczny* (2018). URL: <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/gdynia-i-solaris-podpisaly-umowe-na-30-trolejbusow-58191.html> (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [78] trolley:motion. *Arnhem [NL] - Umgebaute Batterie-Trolleybusse werden offiziell vorgestellt*. 2019. URL: <https://www.trolleyemotion.eu/trolleynews/beitrag/?id=6987> (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [79] trolley:motion. *Ceske Budejovice III [CZ] - Erster von 11 neuen Trolleybussen geliefert*. 2018. URL: <https://www.trolleyemotion.eu/trolleynews/beitrag/?id=7404> (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [80] trolley:motion. *Ceske Budejovice III [CZ] - Zwei neue Trolleybusse vorgestellt*. 2016. URL: <https://www.trolleyemotion.eu/trolleynews/beitrag/?id=7123> (Zugriff am 29. 12. 2021).

- [81] trolley:motion. *Freier Wissensbereich - 12 Der Elektroantrieb*. 2021. URL: <https://www.trolleyemotion.eu/freier-wissensbereich/> (Zugriff am 16. 12. 2021).
- [82] trolley:motion. *Freier Wissensbereich - Trolley- und Elektrobusse in der Presse - 2021 06 Situation der Trolleybusse in Europa Nahverkehrspraxis*. 2021. URL: <https://www.trolleyemotion.eu/freier-wissensbereich/> (Zugriff am 20. 12. 2021).
- [83] trolley:motion. *Linz [AT] - Ausschreibung über 20 Gelenktrolleybusse veröffentlicht*. 2014. URL: <https://www.trolleyemotion.eu/trolleynews/beitrag/?id=5996%2F> (Zugriff am 15. 12. 2021).
- [84] trolley:motion. *Linz [AT] - Option für neun DGT gezogen*. 2021. URL: <https://www.trolleyemotion.eu/trolleynews/beitrag/?id=9253> (Zugriff am 31. 12. 2021).
- [85] trolley:motion. *Trolleybusstadt: Linz [Österreich]*. 2019. URL: <https://www.trolleyemotion.eu/trolleystaedte/stadt/?id=170> (Zugriff am 29. 12. 2021).
- [86] UITP international Association of Public Transport. „INFRASTRUCTURE FOR IN MOTION CHARGING TROLLEYBUS SYSTEMS“. In: (2019). URL: <https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2021/01/Knowledge-Brief-Infrastructure-May-2019-FINAL.pdf> (Zugriff am 28. 01. 2022).
- [87] UITP international Association of Public Transport. „INFRASTRUCTURE FOR IN MOTION CHARGING TROLLEYBUS SYSTEMS“. In: (2021). URL: <https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2021/07/Knowledge-Brief-IMC.pdf> (Zugriff am 21. 12. 2021).
- [88] Van Hool NV. *Exqui.City 24 Electric*. 2021. URL: https://www.vanhool.be/uploads/versions/image_thumb/73/exqui-city-24-electric.png?t= (Zugriff am 14. 12. 2021).
- [89] C. Vana. „Der elektrische Antriebsstrang in Nahverkehrssystemen“. ger. In: *Elektrotechnik und Informationstechnik* 123.10 (2006), S. 419–423. ISSN: 0932-383X.
- [90] Vossloh-Kiepe GmbH. *Obus-Stromabnehmer 12 SA 2*. 2002. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/21195175/obus-stromabnehmer-trolleybus-current-bei-vossloh-kiepe> (Zugriff am 25. 01. 2022).
- [91] V. R. Vuchic. *Urban Transit Systems and Technology*. eng. Hoboken, N.J.: J. Wiley, 2007. ISBN: 9780471758235.
- [92] Wikimedia Commons. *Plan der Oberleitungsbusse in Linz*. 2019. URL: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Plan_der_Oberleitungsbusse_in_Linz.png (Zugriff am 29. 01. 2022).
- [93] ZeEUS. *ZeEUS eBus Report 2*. Forschungsber. UITP, the International Association of Public Transport, 2018. 178 S. URL: <https://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-report2017-2018-final.pdf> (Zugriff am 28. 12. 2021).

Anhang

Tab. 10: Übersicht über bestehende akkubetriebene Trolleybus-Netze mit Streckenladung

Land	Stadt	Akkukapazität (kWh)	Reichweite (km)	Hersteller und Modell	Plätze	Jahr	Quelle(n)
Österreich	Salzburg	60	20	HESS lightTram [®] 19 DC	156	2019	[13], [7],[51]
Deutschland	Eberswalde	72	18	Solaris Trollino 18 AC	175	2014	[93], [22]
Deutschland	Solingen	60	20	Solaris Trollino 18,75 BOB	115	2018	[68], [74]
		45	unbekannt	Solaris Trollino 12 BOB	85	2021	[64]
Deutschland	Esslingen	58	20-40	Solaris Trollino 18	111	2016	[73]
Schweiz	Zürich ^a	60	10-30	Hess SwissTrolley plus	118	2017+2020	[66]
		70	10-30	Hess Doppelgelenk-Trolleybus plus	156	2018	[65]
Schweiz	Genf	28	4-7	Van Hool Exqui.City 18 T	131	2015	[93], [75]
Italien	Rimini	49	unbekannt	Van Hool Exqui.City 18 T	131	2021	[2]
Italien	Milan	45	14	Solaris Trollino 18	136	2019	[71]
Tschechien	Ceske Budejovice	unbekannt	10-22	Solaris/Skoda 27Tr	167	2016+2018	[80], [79]
Tschechien	Plzen	45,4	unbekannt	Skoda 26Tr	94	2017	[93]
Ungarn	Szeged	81	unbekannt	Ikarus-Skoda Tr187.2	2016	125	[93]
Polen	Gdynia	58	> 12	Solaris Trollino 12	81	2018	[93], [77]
		87	30	Solaris Trollino 18	136	2018	[76], [77]
Niederlande	Arnhem	30	18	HESS Swisstrolley 4	162	2019	[30], [22], [78]
Russland	St. Petersburg	unbekannt	7	Trolza Megapolis 12 m	unbekannt	2007	[28]

^aSeit dem Jahr 2017 wurden alle Oberleitungsbusse mit einem Akku ausgerüstet um die Flexibilität der Fahrzeuge zu erhöhen [67]. In der Auflistung werden nur zwei Modelle der vorhanden Busflotte angeführt, die über Streckenladung betrieben werden.