



E-Bus-Strategie

Schlussbericht

Impressum

E-Bus-Strategie

Schlussbericht

Zürich, 4. April 2019

3191a_Bericht_E-Bus-Strategie-VVL_ueberarbeitet_20190404.docx

Auftraggeber

Verkehrsverbund Luzern

Projektleitung

Daniel Heer, VVL

Autorinnen und Autoren

Matthias Lebküchner, Hans-Jörg Althaus

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

Arbeitsgruppe

Auftraggeber (Daniel Heer und Samuel Urech)

Vertretung vbl (Christian Zumsteg)

Vertretung Postauto (Evelyne Wüest)

Vertretung CKW (Centralschweizerische Kraftwerke AG; Jürgen Müller)

Vertretung ewl (ewl energie wasser luzern; Jörg Weingartner)

Auftragnehmer

Begleitgruppe

Mitglieder der Arbeitsgruppe

Vertretung der im Gebiet des VVL tätigen Bus-Transportunternehmen (Martin Senn, AAGR; Patrick Schnellmann, AAGS; Mathias Grünenfelder, AVA; Andreas Zemp, vbl; Beat Wiget, Postauto)

Vertretung der regionalen Entwicklungsträger (Armin Camenzind, LuzernPlus; André Marti, Sursee-Mittelland)

Experten elektrische Antriebe / Speicher (Vinzenz Härri, HSLU; Andrea Vezzini, BFH)

Inhalt

Zusammenfassung	5
1. Ausgangslage, Auftrag	9
2. Vorgehen	10
2.1. Ökonomische Bewertung	10
2.2. Ökologische Bewertung	11
2.3. Weitere Kriterien	13
3. Antriebsoptionen	14
3.1. Batteriebusse	16
3.1.1. Eigenschaften von Batterien und Annahmen zu deren Entwicklung	18
3.1.2. Depotlader	21
3.1.3. Gelegenheitslader statisch	23
3.1.4. Kombi-Lader	23
3.1.5. Gelegenheitslader dynamisch	24
3.1.6. Anforderungen an die Stromversorgung zum Laden der Batterien	24
3.1.7. Betriebliche Aspekte	25
3.1.8. Anforderungen an Depots und Werkstätte	26
3.2. Brennstoffzellenbusse	26
3.3. Bio- und synthetische Treibstoffe (Biodiesel / Biogas / PtX)	27
3.4. Plug-In-Hybrid	30
4. Zweckmässige Einsatzfelder im Kanton Luzern	31
4.1. Beispiellinien	32
4.1.1. Stadt-Linie 60.020 (Gelenkbus)	34
4.1.2. Aggo-Linie 60.040 (Gelenkbus)	37
4.1.3. Agglo-Linie 60.025/26 (Normalbus)	41
4.1.4. Regionallinie 60.061 (Gelenkbus)	44
4.1.5. Regionallinie 60.271 (Normalbus)	47
4.1.6. Quartierbuslinie 60.011 (Midibus)	50
4.2. Erkenntnisse Zweckmässigkeitsbetrachtung Linien-Cluster	53

4.2.1.	Ökonomische Bewertung	53
4.2.2.	Ökologische Bewertung	56
4.2.3.	Weitere Kriterien	56
4.3.	Fazit	57
5.	Strategie	62
5.1.	Langfristige Strategie zur Umsetzung der Vision	62
5.2.	Entwicklungspfad	63
5.3.	Anforderungen an die Stromversorgung	64
5.4.	Vergleich mit anderen Städten/Regionen	65
5.5.	Periodische Überprüfung der Strategie	66
	Glossar	67
	Annex 1: Annahmen zur Entwicklung der Batterien	68
	Annex 2: Wichtigste Annahmen für die Kostenrechnung	71

Zusammenfassung

Die Elektrobustategie (E-Bus-Strategie) zeigt auf, mit welchen Antriebsoptionen sich die Vision des Verkehrsverbunds Luzern (VVL) umsetzen lässt: «Um 2040 fahren im Kanton Luzern nur noch mit erneuerbarer Energie betriebene, energieeffiziente und emissionsarme Busse.»

E-Busse im Vergleich zum heutigen Dieselfbus

Im Zeithorizont 2030 werden die Vollkosten von Elektrobustlinien aufgrund der teureren Fahrzeuge und Ladeinfrastrukturen je nach Einsatzfeld 15% bis 25% höher sein als von Dieselfbuslinien. Der Dieselpreis müsste stark ansteigen (Treibstoffpreis für konzessionierten Betrieb >2.50 CHF/Liter), damit die Elektrobuste aus betriebswirtschaftlicher Sicht besser abschneiden als Dieselfbuste. Das ist nur realistisch, wenn Diesel mit einer substantiellen Lenkungsabgabe verteuert und die Rückerstattung der Mineralölsteuer aufgehoben wird.

Mit Elektrobustussen lassen sich jedoch deutliche Umweltvorteile gegenüber den Dieselfbustussen erzielen. Einerseits reduziert der Elektroantrieb den Primärenergieverbrauch um 50% bis 60%. Andererseits verkehren die Busse praktisch frei von Treibhausgasemissionen, sofern der dazu bezogene Strom aus erneuerbarer Energie stammt. Vorteilhaft schneidet der Elektrobust auch bei den Stickoxid- und Partikelemissionen so wie beim Lärm ab.

Bei den Auswirkungen im Betrieb und für die Angebotsplanung ist zu unterscheiden, um welchen Typ Elektrobust es sich handelt. Der Depotlader ist diesbezüglich gleich bewertet wie der Dieselfbus. Die Gelegenheitslader statisch (Nachladen über stationäre Ladestationen beispielsweise am Linienende) oder dynamisch (Nachladen über die Oberleitung, auch IMC für «in motion charging» genannt) erweisen sich bei diesen Kriterien als nachteilig. Im Betrieb schränkt die Gebundenheit an die Ladeinfrastruktur entlang der Linie die Einsatzflexibilität des Fahrzeugs bzw. der Flotte ein. Insbesondere ermöglichen die Gelegenheitslader keine Bahnersatzangebote, Ersatzbetriebe bei Betriebsstörungen oder Baustellen, Extrafahrten bei Anlässen etc. Bei der Angebotsgestaltung resultieren vor allem für den Gelegenheitslader statisch Restriktionen, welche die Flexibilität einschränken. Beispielsweise bedeuten Linienverlängerungen i.d.R. auch die Verlegung der Ladestationen. Liniensplitting am Linienende oder Verdichtungsangebote auf Teilstrecken während der Hauptverkehrszeiten können zusätzliche Ladestationen auslösen. Auch Durchmesserlinien lassen sich mit einem Ladekonzept mit Ladestationen entlang der Linien weniger flexibel umsetzen. Entweder sind Fahrzeuge mit grösseren Batterien erforderlich mit entsprechend zunehmenden Ladezeiten an den Linienenden. Oder im Zentrum sind zusätzliche Ladestationen und Ladevorgänge erforderlich, was lange Zwischenhalte zur Folge hat und somit die Attraktivität einer Durchmesserlinie aus Kundensicht in Frage stellt.

Bei den Auswirkungen auf den Stadtraum sind die Gelegenheitslader aufgrund wahrnehmbarer Ladeinfrastruktur leicht negativ bewertet im Vergleich zum Depotlader bzw. Dieselbus.

Welche E-Busoption für welches Einsatzfeld?

Der Depotlader bietet sich sowohl für städtische als auch für Agglomerations- und Regionallinien als zweckmässige Option an. Voraussetzung ist jedoch, dass das Nachladen der Batterien keinen zusätzlichen Fahrzeugbedarf auslöst. Mittelfristig eignet sich der Depotlader mit noch beschränkten Reichweiten vor allem für Linien mit Hauptverkehrszeiten-Verstärkungskursen. Die nur in den Hauptverkehrszeiten eingesetzten Fahrzeuge ermöglichen ein Nachladen auch untertags, ohne dass die Fahrzeugflotte vergrössert werden muss. Längerfristig wird der Einsatz von Depotladern auch auf Linien mit Tageseinsätzen von 350 bis 400 km möglich sein.

Für Gelenkbuslinien im städtischen Gebiet stellt auch das Konzept mit Laden über die Oberleitung eine zweckmässige Alternative dar, sofern ein bereits bestehendes Oberleitungsnetz mitbenutzt werden kann. In diesem Fall sind die Kosten vergleichbar mit dem Depotlader.

Für Stadt- und Agglomerationslinien bietet sich grundsätzlich auch der Gelegenheitslader mit statischem Ladekonzept bzw. Ladestationen auf der Linie an. Dieses Konzept ist jedoch auch bei günstigen Bedingungen (nur zwei Ladestationen) nicht massgeblich kostengünstiger als der Depotlader. Nachteilig wirkt sich beim Gelegenheitslader statisch die eingeschränkte betriebliche Flexibilität gegenüber dem Depotlader aus. Ähnliches gilt auch für die Angebotsgestaltung. Zwar laufen momentan in der Schweiz verschiedene Versuche mit Gelegenheitsladern statisch bzw. solche sind geplant (z. Bsp. Linie 17 in Bern). Die Absichten dahinter sind jedoch in der Regel, dass die Transportunternehmen möglichst rasch Erfahrungen mit E-Bus-Einsätzen im Linienbetrieb (nicht nur mit einzelnen Fahrzeugen) machen wollen. Mit dem Depotlader ist dies heute aufgrund noch ungenügender Reichweiten noch nicht möglich.

Die Zweckmässigkeit der E-Bus-Optionen ist in hohem Masse abhängig von den spezifischen Gegebenheiten der Linien. Deshalb ist in der Umsetzung für jede Linie bzw. jedes Linienbündel die optimalste E-Bus-Variante in einem Detailprojekt zu evaluieren. Dabei sind jeweils die spezifischen Randbedingungen vor Ort zu berücksichtigen.

Langfristige Strategie zur Umsetzung der Vision

Dem vorliegenden Projekt liegt eine Vision anstelle eines konkreten Ziels zugrunde. Entsprechend fokussiert diese Strategie nicht auf einen detaillierten Umsetzungspfad, sondern diskutiert Fahrzeug- und Einsatzoptionen, mit denen die Vision am ehesten erreicht werden könnte.

- Das städtische Busliniennetz soll langfristig aus einer Mischflotte mit dynamischen Gelegenheitsladern (IMC) und Depotladern bestehen:

- Bei anstehendem Fahrzeugersatz sind IMC-fähige Trolleybusse zu beschaffen; bei anstehenden Erneuerungsinvestitionen in das Oberleitungsnetz ist jeweils mit Blick auf das IMC-Ladekonzept die dafür erforderliche Oberleitungsinfrastruktur zu überprüfen.
- Umstellung von Dieselbuslinien auf IMC, wo dies aus wirtschaftlicher und betrieblicher Sicht sinnvoll ist.
- Restliche Linien mit Depotlader:

Mit dieser Strategie bleibt das Trolleybus System vom Grundsatz her erhalten. Es wird jedoch aufgrund des technologischen Fortschritts flexibilisiert. Der Trolleybus wandelt sich somit zu einem sog. Batterie-Trolleybus, welcher je nach Batteriegrösse auch längere Strecken ohne Oberleitung befahren kann.

- Die Agglomerations- und Regionallinien sind auf Depotlader-Busse umzustellen:
 - Gelenkbus-Linien mit Tageseinsätze bis ca. 350 – 400 km;
 - Normalbuslinien mit Tageseinsätzen bis ca. 400 – 450 km;
 - allenfalls Kombilader-Konzepte prüfen, um die Reichweiten zu erhöhen bzw. die Batteriegrösse zu reduzieren; für Linien, welche Reichweiten über 400 – 450 km erfordern, sind Plug-in-Hybridbusse (Batteriebus mit Range Extender), Brennstoffzellenbusse oder allenfalls mit Biotreibstoffen betriebene Busse zu prüfen.

Entwicklungspfad

Zur Erreichung der oben formulierten Langfriststrategie soll unter Berücksichtigung des technologischen Fortschritts folgender Umsetzungspfad verfolgt werden:

Zeithorizont 2020 - 2025

- Städtisches Netz:
 - Erweiterung des Trolleybusnetzes durch IMC, wo aus wirtschaftlicher und betrieblicher Sicht auch längerfristig gegenüber dem Depotlader vorteilhaft; als mögliche Linie bietet sich die geplante Linie 3 (Verknüpfung der Dieselbuslinie 12 und des bereits elektrifizierten Asts der Trolleybuslinie 8 nach Würzenbach) an.
 - Depotlader, wo auch längerfristig IMC keine zweckmässige Alternative darstellt, als Pilot für Linien, auf welchen die noch vergleichsweise geringen Reichweiten nicht zu zusätzlichem Fahrzeugbedarf führen; mögliche Linien könnten die Gelenkbuslinien 20 und 22 sowie die Normalbuslinie 14 sein. Kurzfristig wären auch Pilotversuche mit Kombiladern (mit beispielsweise mobilen Ladestationen an den Endhaltestellen) denkbar.
- Agglomerations- und Regionallinien:
 - Pilot mit Depotladern für Linien, die keinen zusätzlichen Fahrzeugbedarf auslösen.

- Um kurzfristig bereits Umweltvorteile erzielen zu können, sind auch Plug-in-Hybrid-Busse (Vorinvestitionen im Depot für späteren Depotlader) oder Biodiesel-Busse zu prüfen.

Ab 2025/2030

- weitere Umstellungen auf IMC
- Depotlader für Regelbetrieb auf geeigneten Linien (vertretbare Mehrkosten ggü. Diesel).

Anforderungen an die Infrastruktur zur Stromversorgung

Die E-Bus-Strategie stellt auch zusätzliche Anforderungen an die Stromversorgung. Vor allem das Depotlade-Konzept mit Nachladen der Batterien über Nacht bedingt höhere Stromanschlussleistungen in den Busgaragen, als dies heute der Fall ist. Damit beispielsweise 30 Busse mit einer Ladeleistung von 150 kW gleichzeitig geladen werden können, ist eine Anschlussleistung von 5 MW erforderlich. Laut Aussagen der Stromnetzbetreiber ist an den typischen Standorten von Busdepots sowohl in der Stadt als auch in der Region eine Anschlussleistung von 5 MW im Allgemeinen möglich. Bei einer grösseren Depotlader-Flotte ist ergänzend ein intelligentes Lademanagement vorzusehen, um den Leistungsbedarf zu minimieren.

Gelegenheitslader brauchen ebenfalls Ladeinfrastruktur in den Depots, damit die Busse mit voller Batterie ausfahren können. Aufgrund der relativ kleinen Batterien bei diesen Bussen ist die benötigte Ladeleistung pro Bus gering. Deshalb stellt auch eine grosse Gelegenheitslader-Flotte keine besonders hohe Anforderung an die Ladeleistung im Depot. Bei den in der Strategie empfohlenen dynamischen Gelegenheitsladern wird sich der Leistungsbedarf ab Oberleitung gegenüber derjenigen von klassischen Trolleybussen etwa verdoppeln, weil nebst dem Strom fürs Fahren auch Strom zum Laden der Batterie benötigt wird. Speziell auf Streckenabschnitten, die von mehreren Linien genutzt werden, kann so eine Verstärkung der Einspeiseleistung nötig werden. In solchen Fällen kann es sinnvoll sein, über kürzere Einspeiseabschnitte oder Erhöhung der Einspeisespannung nachzudenken, was zusätzliche Stabilität ins Oberleitungsnetz bringen würde.

Periodische Überprüfung der Strategie

Die vorliegende E-Bus-Strategie basiert auf dem aktuellen Wissensstand zu den möglichen Antriebsformen, welche künftig einen energieeffizienten, emissionsarmen Busbetrieb mit erneuerbarer Energie ermöglichen. Angesicht der teilweise noch grossen Unsicherheiten in Bezug auf die Entwicklungen der entsprechenden Technologien, namentlich zur Reichweite von Batteriebussen und zu den Preisen der Batterien, soll die E-Bus-Strategie für den VVL periodisch überprüft werden.

1. Ausgangslage, Auftrag

Die Schweiz hat sich im Übereinkommen von Paris dazu verpflichtet, die Emission von Treibhausgasen (THG) soweit zu reduzieren, dass die durchschnittliche globale Temperatur im Vergleich zur vorindustriellen Zeit um maximal 2 Grad ansteigt. Gemäss Berechnungen des IPCC bedeutet das, dass weltweit ab der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts keine Treibhausgase mehr emittiert werden dürfen, sondern im Gegenteil CO₂ aus der Luft entzogen und gebunden werden muss. Vor diesem Hintergrund sucht der Verkehrsverbund Luzern (VVL) nach Möglichkeiten, ihre Transportdienstleistungen mittelfristig ohne Emission von THG anbieten zu können. Der VVL ist sich bewusst, dass eine Reduktion von THG nicht nur im Fahrdienst sondern auch bei den benötigten Gebäuden und deren Betrieb sowie in allen anderen Geschäftsprozessen nötig sein wird. Weil innerhalb der ÖV-Betriebe der grösste Anteil der THG-Emissionen auf die Transportdienstleistungen fällt, konzentriert sich diese Strategie ausschliesslich auf diesen Bereich.

Die Elektrobusstrategie (E-Bus-Strategie) zeigt auf, mit welchen Antriebsoptionen sich folgende Vision des VVL umsetzen lässt: «Um 2040 sollen im Kanton Luzern nur noch mit erneuerbarer Energie betriebene, energieeffiziente und emissionsarme Busse fahren.» Die E-Bus-Strategie enthält folglich für den Busverkehr Aussagen zu dessen zukünftig zweckmässigen Traktionsformen. Zudem ist der Entwicklungspfad dargestellt, wie ausgehend von den heutigen Busflotten diese Vision schrittweise umgesetzt werden kann. Dabei sind die unterschiedlichen Einsatzgebiete (Stadt, Agglomeration, Region) und Randbedingungen zu berücksichtigen.

Die Elektrobusstrategie aktualisiert und ersetzt die Trolleybus Strategie 2013. Sie aktualisiert den aktuellen Wissensstand zu erneuerbar und CO₂-arm angetriebenen Bussen und zeigt die Möglichkeiten und Grenzen der Traktion mit erneuerbaren Energien auf. Zudem werden die Auswirkungen auf die Kosten des öffentlichen Busverkehrs grob abgeschätzt.

Die Ergebnisse der E-Busstrategie finden Eingang in den öV-Bericht 2022 bis 2025.

Emissionsarm bezieht sich primär auf Treibhausgasemissionen im gesamten Lebenszyklus, also unter Berücksichtigung der Emissionen, die beim Bau und der Entsorgung der Fahrzeuge entstehen. Die lokalen Emissionen (z.B. Stickoxide, Partikel oder Lärm) während des Betriebs der Fahrzeuge sind aber ebenfalls angesprochen.

Heute (Datenbasis Ist 2018) werden im Verkehrsverbund Luzern bereits 17% der Buskilometer elektrisch angeboten (ausschliesslich mit Trolleybus). Damit werden rund 42% aller Bus-Fahrgäste befördert.

2. Vorgehen

Im Rahmen der zu entwickelnden E-Bus-Strategie geht es nicht um einen allgemeinen Vergleich verschiedener Antriebstechnologien, sondern um einen auf das Marktgebiet des VVL adaptierten Vergleich, welcher die spezifischen Gegebenheiten beim Angebot/Betrieb und der Infrastrukturen sowie die Randbedingungen der Energielieferanten berücksichtigt. Die Strategieentwicklung erfolgte anhand der folgenden drei Schritte:

1. **Überblick aktueller Stand der Antriebsoptionen mit erneuerbaren und CO₂-armen Energien:** Welche Antriebsoptionen kommen grundsätzlich in Frage? Wie sieht die heutige und künftige Verfügbarkeit dieser Optionen auf dem Markt aus? --> Kapitel 3.
2. **Zweckmässige Einsatzfelder im Kanton Luzern:** Die identifizierten Antriebsoptionen werden hinsichtlich der Kriterien Kosten, Ökologie, Betrieb, Stadtraum/Ästhetik sowie Kundennutzen miteinander verglichen. Diese Evaluation umfasst jedoch nicht die gesamte Busflotte des VVL. Der Vergleich erfolgt lediglich für Beispiel-Linien, welche je eine typische Einsatzsituation repräsentieren (Stadtlinien, Agglomerationslinien, Regionallinien und Quartierlinien). **Die Annahmen bezüglich des Technologiestands und der Kosten beziehen sich dabei auf den Zeithorizont 2030.** Die Erkenntnisse daraus werden anschliessend auf das gesamte Gebiet übertragen.
--> Kapitel 4
3. **Formulierung der E-Bus-Strategie:** Aus den gewonnenen Erkenntnissen zu den zweckmässigen Einsatzfeldern der untersuchten Antriebsoptionen wird die langfristige Strategie zur Erreichung der Vision formuliert¹, inkl. Entwicklungspfad für eine schrittweise Umsetzung.
--> Kapitel 5

2.1. Ökonomische Bewertung

Der ökonomischen Bewertung liegen folgende methodischen Elemente bzw. Annahmen zugrunde:

- Dynamische Kostenrechnung nach der Nettobarwert-Methode (NBW) über zwei Fahrzeuggenerationen;
- Es werden nur Kosten-Elemente berücksichtigt, welche sich zwischen den Optionen unterscheiden können:

¹ Die Vision lautet: «Um 2040 sollen im Kanton Luzern (VVL) nur noch mit erneuerbarer Energie betriebene, energieeffiziente und emissionsarme Busse fahren»

- Fahrzeugkosten: Beschaffung, Energie Betrieb, Wartung/Unterhalt
- Infrastruktur Energieversorgung: Investitionen, Betrieb/Unterhalt
- Zusätzliche Betriebskosten aufgrund eines erhöhten Fahrzeugbedarfs
- Garagierungskosten bei zusätzlichem Fahrzeugbedarf
- Annahme Lebensdauer Fahrzeuge: 12 Jahre
- Bei den Batterien werden zwei Szenarien in Bezug auf die künftigen Entwicklungen berücksichtigt. Dabei werden einerseits die Energiedichten- und die Preise (vgl. dazu Ausführungen in Kapitel 3.1.1), andererseits die Lebensdauer der Batterien (vgl. Ausführungen im Kapitel 4) variiert. Nicht berücksichtigt bei den Batterien werden sog. Second-Life Aspekte also beispielsweise die Verwendung von alten Busbatterien als stationäre Energiespeicher.
- Basis für betriebliche Analysen: Fahrpläne 2018

2.2. Ökologische Bewertung

Da der Fokus dieser Studie auf Energieeffizienz und Treibhausgas- (THG-)Emissionen liegt, werden für die ökologische Bewertung der kumulierte Energieaufwand sowie die verursachten THG-Emissionen quantifiziert. Die Bewertung basiert dabei auf einem vereinfachten Lebenszyklusansatz. Das bedeutet, dass neben den Energieverbräuchen und Emissionen, die beim direkten Betrieb der Fahrzeuge verursacht werden, auch die relevanten Emissionen aus der Herstellung, dem Unterhalt und der Entsorgung der Energieträger und der Fahrzeuge berücksichtigt werden. Die Verwendung des Lebenszyklusansatzes ist notwendig, weil die Umweltauswirkungen der unterschiedlichen Antriebstechnologien in unterschiedlichen Lebenszyklus-Phasen liegen. Bei Verbrennungsmotoren stammen z.B. über 95% der THG-Emission aus dem Betrieb des Fahrzeuges. Bei Batteriefahrzeugen, die mit erneuerbarem Strom betrieben werden, stammt hingegen ein viel grösserer Teil (20-30%) der Emission aus der Fahrzeug- und Batterieherstellung. Einzelne Phasen des Lebenszyklus auszublenden würde entsprechend zu einem unvollständigen Vergleich führen. Analog zur ökonomischen Bewertung wird auf jene Beiträge fokussiert, die sich in den Varianten wesentlich unterscheiden. So können z.B. die Strasseninfrastruktur oder die gesamten administrativen Prozesse, die von allen Optionen in ähnlicher Weise beansprucht werden, für die vorliegende Betrachtung vernachlässigt werden. Hingegen sind insbesondere die Herstellung der Fahrzeuge und deren Komponenten enthalten (Batterie, Motor, Brennstoffzellen etc.) sowie die Produktion der Treibstoffe und der zum Betrieb benötigten Elektrizität. Implizit enthalten sind auch generische Emissionen aus der Herstellung und der Nutzung der Ladeinfrastruktur. Der Energiebedarf und die THG Emissionen der Entsorgung der Fahrzeuge bzw. deren Komponenten sind ebenfalls enthalten. Dabei werden Recyclingprozesse

(im Wesentlichen für Metalle bzw. Komponenten, die weitgehend aus Metall sind) ohne Aufwendungen für den Prozess, aber dafür auch ohne Gutschriften für die zurückgewonnenen Materialien bilanziert. Dieser Ansatz wird «cut-off» genannt und resultiert für Fahrzeuge, insbesondere für Elektrofahrzeuge, mit einer relativ hohen Umweltbelastung durch den Entsorgungsprozess. Damit werden die Umweltbelastungen der Fahrzeugherstellung und -entsorgung tendenziell überschätzt.

Die benötigten Daten zur Berücksichtigung der Energievorketten und der Produktion von Fahrzeugen und deren Komponenten basieren alle auf der ecoinvent Datenbank² sowie dem THELMA Projekt³ und dessen Nachfolgeprojekten im Rahmen des SCCER am Paul-Scherrer-Institut (PSI).

In zweiter Linie interessieren auch die Luftschadstoffe sowie die Lärmemissionen aus dem Betrieb der Busse. Im Gegensatz zu den THG wirken diese Emissionen nur lokal. Weil der Fokus der vorliegenden Bewertung auf der Region Luzern liegt, werden lediglich die Emissionen des Busbetriebes vor Ort berücksichtigt. In dieser Studie beschränken wir uns auf eine qualitative Beurteilung der Stickoxid- (NO_x) und Feinstaub- (PM) Emissionen auf Basis von Werten aus dem Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA v3.3). Abrieb von Reifen, Bremsen⁴, Strasse und von Kontakten und Fahrdrähten bei Trolleybussen⁵ werden nicht berücksichtigt, weil sie für alle Antrieboptionen ähnlich oder wenig relevant sind.

Eine Quantifizierung der Lärmemission wäre sehr aufwändig und müsste für jede Linie spezifisch erfolgen. Das war im Rahmen dieses Projektes nicht möglich. Daher wird Lärm nur qualitativ beurteilt. Lärmemission hängt einerseits vom Motorengeräusch der Busse ab, andererseits aber auch von deren Roll- und Aerodynamikgeräuschen. Zudem bestimmen auch situative Faktoren wie die Strassenbeschaffenheit, die aktuelle Beschleunigung und Geschwindigkeit sowie die Motorenlast (und damit Steigungen und Besetzung des Fahrzeuges) die Lärmemission. Generell lässt sich sagen, dass Elektrobusse ähnliche Roll- und Aerodynamikgeräusche aber viel weniger Motorenlärm verursachen als Busse mit Verbrennungsmotoren. Entsprechend sind sie deutlich leiser in Situationen, in denen der Motorenlärm die gesamte Lärmemission dominiert. Das ist generell bei tiefer Geschwindigkeit und insbesondere beim Anfahren sowie bei Bergfahrten der Fall. E-Busse sind somit vor allem in den Quartieren leiser. Bei konstanter Fahrt mit

² www.ecoinvent.org

³ Schlussbericht unter <https://www.psi.ch/lea/HomeEN/Final-Report-THELMA-Project.pdf>

⁴ Bremsabrieb ist bei elektrifizierten Fahrzeugen zwar geringer als bei reinen Verbrennungsmotorfahrzeugen, da wir aber davon ausgehen, dass im betrachteten Zeitrahmen alle Busse zu einem gewissen Grad hybridisiert sein werden, spielt das keine Rolle.

⁵ Gestützt auf eine INFRAS-Studie von 2008 (INFRAS / SBW / EMPA (2008) Systementscheid Antriebskonzept. Grundlagenbericht) schätzen wir, dass der Abrieb von Kupfer und Kohlestaub aufgrund des Kontaktes und des Fahrdrabtes beim Trolleybus im Vergleich zu den PM-Emissionen von Dieseln rund 10 mal 10-mal geringer ist.

relativ hohem Tempo (über 50 km/h, typischerweise auf Überlandstrecken) sind die Unterschiede zwischen Elektro- und Verbrennungsmotorbussen nur noch gering.

2.3. Weitere Kriterien

Folgende weiteren Kriterien wurden qualitativ einbezogen:

- Betriebliche Aspekte wie z.B. Einsatzflexibilität,
- Auswirkungen auf den Stadtraum wie beispielsweise visuelle Aspekte von Ladestationen oder Oberleitungen,
- Kundennutzen, z.B. Fahrkomfort.

In der Bewertung nicht miteinbezogen wurden generelle Akzeptanz- bzw. Image-Aspekte der E-Mobilität.

Zudem werden die möglichen E-Bus-Optionen unter den aktuellen Rahmenbedingungen bewertet. Mögliche Regulierungen des Bundes könnten diese Rahmenbedingungen verändern.

3. Antriebsoptionen

Die Vision, dass dereinst im Verkehrsverbund Luzern nur noch mit erneuerbarer Energie betriebene, energieeffiziente und emissionsarme Busse fahren sollen, bedingt eine entsprechende Energieversorgung sowie den Einsatz geeigneter Antriebsoptionen. Konkret bedeutet die Forderung nach erneuerbarer Energie für den Betrieb der Busse, dass einer (oder mehrere) der folgenden Energieträger eingesetzt werden:

- Strom aus erneuerbaren Quellen: Solar, Wind, Wasser, Geothermie, Biomasse oder Abfälle.
- Wasserstoff, der durch Elektrolyse aus erneuerbarem Strom oder durch Vergasung von biogenen Abfällen und Reststoffen erzeugt wurde.
- Treibstoffe aus biogenen Abfällen und Reststoffen oder aus erneuerbarem Strom und CO₂ aus der Luft: Biodiesel, Bioethanol, Biogas, BtX, PtX;

Damit stehen prinzipiell vier Antriebsoptionen zur Diskussion:

- Klassische Oberleitungsbusse (Trolley)
- Batteriefahrzeuge
- Brennstoffzellenfahrzeuge
- Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren und erneuerbaren Treibstoffen

Im Folgenden ordnen wir diese Optionen in Bezug auf deren Potenziale zur Umsetzung der Vision ein. Die Trolleybusse betrachten wir nicht separat, sondern unter batterieelektrischen Bussen, da die Diesel-Hilfsmotoren in neusten Oberleitungsbussen durch Batterien ersetzt wurden und so kein prinzipieller Unterschied mehr besteht. Aufgrund dieser Reihung werden die Prioritäten für die weitere Analyse der Optionen bestimmt.

Aufgrund der Forderung nach Energieeffizienz lässt sich eine Rangfolge der Antriebsoptionen erstellen: Elektroantriebe sind generell viel effizienter als Verbrenner. Allerdings sind Brennstoffzellenfahrzeuge höchstens halb so energieeffizient wie reine Batteriefahrzeuge. Grund dafür sind die Energieverluste bei der Umwandlung von Strom zu Wasserstoff und zurück zu Strom. Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (Diesel oder Gas) weisen schon im direkten Betrieb eine relativ tiefe Energieeffizienz auf. Wenn noch eine tiefe Umwandlungseffizienz bei der Treibstoffproduktion hinzukommt (wie z.B. bei den synthetischen Treibstoffen aus Biomasse (BtX) oder Strom (PtX)), wird die Gesamteffizienz sehr tief.

Das Kriterium der Erneuerbarkeit der Energie führt schon weitgehend dazu, dass die verbleibenden Optionen CO₂-emissionsarm sind. Die Forderung bezieht sich aber nicht ausschliesslich auf den Betrieb, sondern auf den gesamten Lebenszyklus. Ausserdem sind auch die Schadstoffemissionen aus dem Betrieb der Fahrzeuge zu berücksichtigen:

- Batterieelektrische sowie Brennstoffzellenfahrzeuge sind im Betrieb fast emissionsfrei. Die einzige relevante Emission betrifft den Lärm, der aber deutlich geringer ist als für Alternativen mit Verbrennungsmotoren. Demgegenüber verursachen batterieelektrische Fahrzeuge höhere THG-Emissionen in der Produktion, vor allem für Batterien und Brennstoffzellen.
- Fahrzeuge, die mit Biotreibstoffen (Biogas oder Biodiesel) betrieben werden, emittieren wenig CO₂ (da biogenes CO₂ nicht gezählt wird), hingegen sind Schadstoffe wie NO_x, SO_x, PM und auch andere Treibhausgase wie Methan (v.a. bei Biogas) relevant.

Abbildung 1: Optionen für effiziente, erneuerbare und emissionsarme Busse heute und in Zukunft

	Fossil			Biotreibstoff			Synthetischer Treibstoff			Erneuerbarer Strom		
	Erneuerbar	Effizient	Emissionsarm	Erneuerbar	Effizient	Emissionsarm	Erneuerbar	Effizient	Emissionsarm	Erneuerbar	Effizient	Emissionsarm
Heute												
Verbrennungsmotor	✗	!	✗	✓	!	✓	✓	✗	✓			
E-Motor mit Batterie										✓	✓	✓
E-Motor mit Brennstoffzelle							✓	!	✓			
Hybrid	✗	!	✗	✓	!	✓	✓	✗	✓			
Potenzial Zukunft												
Verbrennungsmotor	✗	!	✗	✓	!	✓	✓	✗	✓			
E-Motor mit Batterie										✓	✓	✓
E-Motor mit Brennstoffzelle							✓	!	✓			
Hybrid	✗	!	✗	✓	!	✓	✓	!	✓			

 Anforderung erfüllt
  Anforderung teilweise erfüllt
  Anforderung nicht erfüllt

Grafik: INFRAS

Aus der Perspektive von Erneuerbarkeit und Energieeffizienz sind klar die batterieelektrischen Fahrzeuge die beste Option, sofern sie mit erneuerbarem Strom geladen werden. Die nächst beste Option sind die Brennstoffzellenfahrzeuge, deren Treibstoff durch Elektrolyse mit erneuerbarem Strom erzeugt wird. Die Anforderungen nur noch teilweise erfüllen Fahrzeuge mit

Verbrennungsmotoren, die mit Bio- oder synthetischem Treibstoff betrieben werden. Die Forderung nach möglichst tiefen THG-Emissionen wird von Elektro- und Biotreibstoff- oder PtX-Bussen ähnlich gut erfüllt. Bezüglich lokal wirkender Schadstoffe sind Elektrofahrzeuge hingegen überlegen. Mit fossilen Treibstoffen betriebene Fahrzeuge erfüllen keine der Anforderungen (vgl. Abbildung 1 auf Seite 15).

Die vorliegende Studie fokussiert deshalb auf batterieelektrische Fahrzeuge⁶. Optionen mit Brennstoffzellen und Biotreibstoffen werden nur in Fällen betrachtet, in denen mittelfristig keine realistische Möglichkeit gesehen wird, die entsprechende Dienstleistung mit batterieelektrischen Fahrzeugen anzubieten. Fossil betriebene Optionen werden in der Studie nicht betrachtet. Einzig Dieselbusse werden für die Kosten- und Emissionsrechnungen als Referenz hinzugezogen.

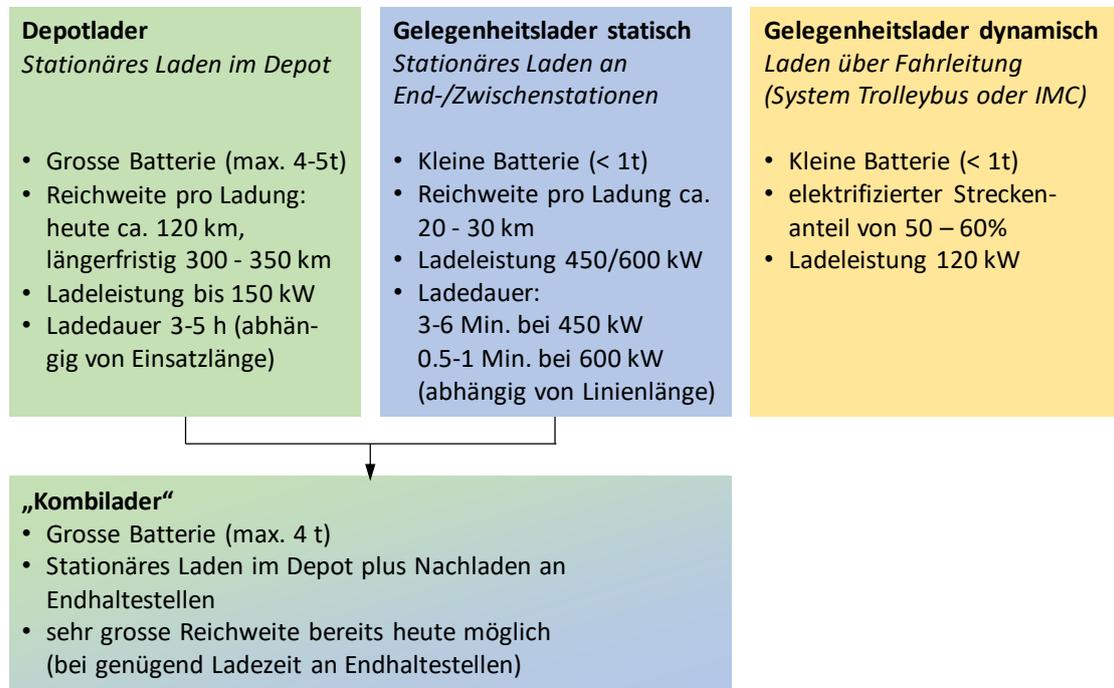
In den folgenden Unterkapiteln werden die elektrischen Fahrzeugoptionen ausführlicher beschrieben. Der Fokus liegt dabei auf den zukünftigen Kosten. Die Kostenentwicklung von Bussen sind stark abhängig von den Entwicklungen der Batterien (technischer Fortschritt, Batteriekosten) und auch von den Entwicklungen der Brennstoffzellen.

3.1. Batteriebusse

Reine Batteriefahrzeuge werden ausschliesslich von Elektromotoren angetrieben. Die wichtigste Restriktion für den Einsatz von Batteriebussen hängt mit der beschränkten Kapazität der Batterien zur Energiespeicherung im Bus zusammen. Zum Umgang mit dieser Restriktion bestehen drei prinzipiell verschiedene Ausprägungen von Batteriebussen sowie eine Mischform (vgl. Abbildung 2).

⁶ Zurzeit ist durch eine ungenügende Kühlung der Motoren und teilweise auch der Batterien der Einsatz von Elektrobussen in extremen Situationen (lange, starke Steigungen) noch beschränkt. Dieses Problem lässt sich mit einer effektiveren Kühlung jedoch relativ einfach lösen; deshalb vernachlässigen wir diese Restriktion für die Betrachtung von zukünftigen Fahrzeugen.

Abbildung 2: Übersicht Batteriebustypen



Grafik: INFRAS. Bei den angegebenen Spezifikationen zu Batteriegrössen, Reichweiten, Ladeleistungen handelt es sich vorerst um grobe Richtwerte (Wissensstand 2018), die anhand von Fallbeispiele konkretisiert werden (vgl. Kapitel 4).

Depotlader verfügen über eine grosse Batterie, die typischerweise über Nacht im Depot geladen wird. Prinzipiell ist sowohl konduktives als auch induktives Laden möglich. Konduktives Laden wird bei Depotladern üblicherweise über eine Steckverbindung realisiert. Theoretisch auch denkbar wäre ein Pantograph, doch rechtfertigen sich die Mehrkosten dafür nicht, wenn der Bus nur einmal täglich angesteckt werden muss. Induktives Laden bedingt erstens, dass am Fahrzeug ein Empfänger (Antenne/Kopplungsspule) installiert ist und zweitens, dass diese zum Laden möglichst präzise und nahe über (oder unter) dem Sender platziert wird. Induktive Ladesysteme sind teurer als konduktive und die Ladeverluste sind deutlich höher. Entsprechend haben sich diese Systeme nicht durchgesetzt. Sollten die technischen Fortschritte in Zukunft dazu führen, dass induktives Laden sowohl bezüglich Kosten als auch bezüglich Energieeffizienz und betrieblichen Aspekten mit konduktivem Laden konkurrenzfähig wird, dürfte induktives Laden zum Thema werden. Die Kernaussagen dieser Studie bezüglich Depotladern würden von so einer Entwicklung aber nicht verändert.

Gelegenheitslader haben kleinere Batterien, die während des Betriebs regelmässig geladen werden müssen. Bei statischen Gelegenheitsladern geschieht dies typischerweise an den Endhaltestellen, wo die Batterie während einiger Minuten mit hoher Leistung geladen wird. Für die

Stromübertragung werden heute meist Pantographen eingesetzt, die entweder auf den Fahrzeugen oder an den Lademasten installiert sind. Es gibt auch einige Tests mit induktiver Schnellladung. Diese Systeme kommen ohne Lademasten aus, was sich positiv auf das Stadtbild auswirkt. Insgesamt sind induktive Systeme bisher aber ineffizienter und teurer als konduktive, weshalb diese Technologie noch nicht über den Testbetrieb hinausgekommen ist. Wie bereits beim Depotlader angemerkt, kann der Entscheid ob konduktiv oder induktiv geladen werden soll aufgrund des Vergleichs dieser Systeme zur Zeit des Entscheides getroffen werden, ohne dass die Kernaussagen dieser Strategie dadurch verändert würden. Eine spezielle Form der statischen Gelegenheitslader ist das TOSA-System, bei dem nicht nur an den Endhaltestellen geladen wird, sondern auch an normalen Haltestellen. Bei diesen sogenannte «Flash-Ladungen» wird während ca. 30 Sekunden mit 600 kW Energie für etwa einen Kilometer Fahrt in die Batterie gespeist. Damit kann die Flexibilität von Gelegenheitsladern erhöht und die benötigte Batteriekapazität reduziert werden. Das TOSA-System benötigt jedoch Ladestationen an zahlreichen Haltestellen, was diese Lösung sehr teuer macht.

Der dynamische Gelegenheitslader (auch IMC für «in motion charging» genannt) ist eigentlich ein Trolleybus, der während der Fahrt an der Oberleitung seine Batterie auflädt und damit in der Lage ist, auch Streckenanteil ohne Oberleitung zu befahren.

Denkbar ist auch eine Kombination von Depot- und Gelegenheitslader, die wir als «Kombi-Lader» bezeichnen. Im Gegensatz zu den vorher angesprochenen Buskonzepten ist «Kombi-Lader» keine gebräuchliche Bezeichnung, sondern eine, die wir im Rahmen dieses Projektes eingeführt haben.

Im Folgenden stellen wir kurz jede der vier genannten Ausprägungen vor (Kapitel 3.1.2 bis 3.1.5). Zuvor, in Kapitel 3.1.1, gehen wir aber noch kurz auf die Batterien ein. Sie stellen heute einen wichtigen Kostenfaktor für Elektrobusse dar. Für die nächsten Jahre (bzw. Jahrzehnte) wird aber, für die Anwendung in Fahrzeugen und speziell in schweren Nutzfahrzeugen, mit einer raschen Optimierung der Eigenschaften und der Preise gerechnet, was eine detaillierte Analyse erfordert. Schliesslich werden in Kapitel 3.1.6 kurz die für die verschiedenen Optionen nötigen Ladesysteme vorgestellt.

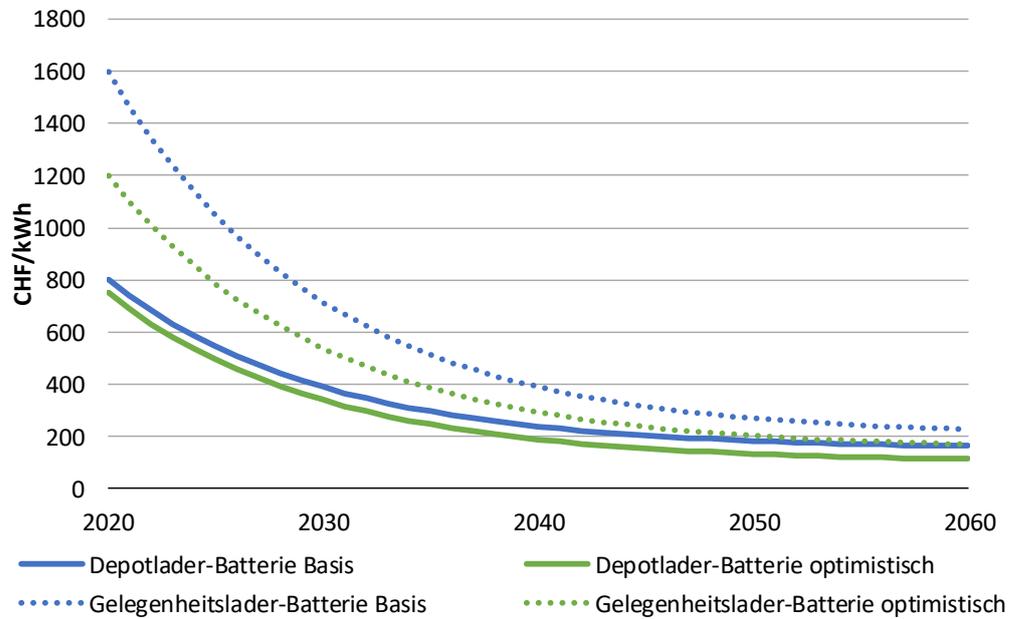
3.1.1. Eigenschaften von Batterien und Annahmen zu deren Entwicklung

In der vorliegenden Studie umfasst der Begriff «Batterie» immer das ganze System, das sich aus den eigentlichen elektrochemischen Zellen, einem Batteriemanagementsystem, einer Kühlung und schliesslich einer Verpackung und Kontaktierung zusammensetzt. In der Literatur und in Herstellerangaben werden oft die Eigenschaften der Zellen mit den Batterieeigenschaften gleichgesetzt, was verwirrend sein kann, weil so z.B. viel zu hohe Energiedichten und viel zu tiefe Preise kommuniziert werden.

In dieser Studie betrachten wir ausschliesslich Lithium-Ionen-Batterien, weil diese Familie bei Elektrofahrzeugen praktisch den gesamten Markt ausmacht. Innerhalb dieser Batteriefamilie gibt es unterschiedliche Typen, die unterschiedliche Stärken und Schwächen haben. In unserem Zusammenhang sind die energie- und die leistungsoptimierten Typen von Bedeutung. Energieoptimiert bedeutet, dass pro Batteriegewicht möglichst viel Energie gespeichert werden kann. Eine energieoptimierte Batterie erreicht hohe Werte für die spezifische Speicherkapazität (kWh/kg) und eignet sich speziell für Depotlader. Leistungsoptimierte Batterien hingegen haben generell eine tiefere spezifische Speicherkapazität, können dafür aber mehr Energie pro Zeit aufnehmen oder abgeben. Damit können sie schneller geladen werden als die energieoptimierten Batterien und eignen sich gut für Gelegenheitslader und Brennstoffzellenbusse. Energieoptimierte Batterien sind pro Speicherkapazität deutlich günstiger als leistungsoptimierte Typen. Für beide Typen werden aber in den nächsten 20-30 Jahren grosse Fortschritte sowohl bezüglich spezifischer Speicherkapazität (kWh/kg) als auch bezüglich spezifischer Kosten (CHF / kWh) erwartet. In dieser Studie betrachten wir ein konservativ geschätztes Basisszenario sowie ein optimistischeres Szenario für diese Entwicklungen (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4).

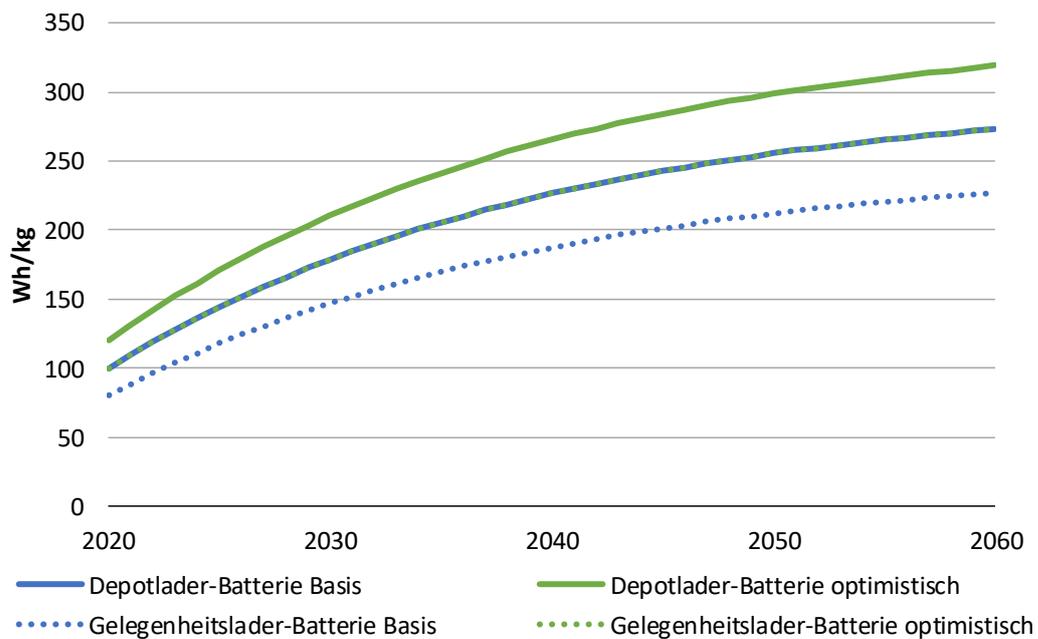
Für den eigentlichen Fahrbetrieb können nicht 100% der Energie einer geladenen Batterie genutzt werden. Um eine möglichst lange Lebensdauer der Batterie zu erreichen, darf die Batterie nicht ganz entladen werden. Ebenfalls reduziert die Alterung die Ladekapazität. Zudem verbraucht ein Elektrobus auch Energie für die Heizung/Lüftung/Klima (HLK) sowie für weitere Nebenaggregate wie Bordcomputer und Bildschirme. Für den eigentlichen Betrieb inkl. Heizung/Lüftung/Klima stehen damit langfristig, je nach Vorhaltung einer betrieblichen Reserve, maximal 60-70% der Batteriekapazität zur Verfügung (vgl. Abbildung 5).

Abbildung 3: Entwicklung spezifische Batteriekosten für Elektrobusse



Grafik: INFRAS. Es ist zu beachten, dass Batterien für Busse deutlich teurer sind als Batterien für Elektro-Pkw. Quellenangaben und Details siehe Annex 1

Abbildung 4: Entwicklung spezifische Batteriekapazität für Elektrobusse



Grafik: INFRAS. Es ist zu beachten, dass Batterien für Busse deutlich geringere spezifische Kapazitäten aufweisen als Batterien für Elektro-Pkw. Quellenangaben und Details siehe Annex 1

Abbildung 5: Nutzbare Energie einer geladenen Batterie



Quelle: VBZ

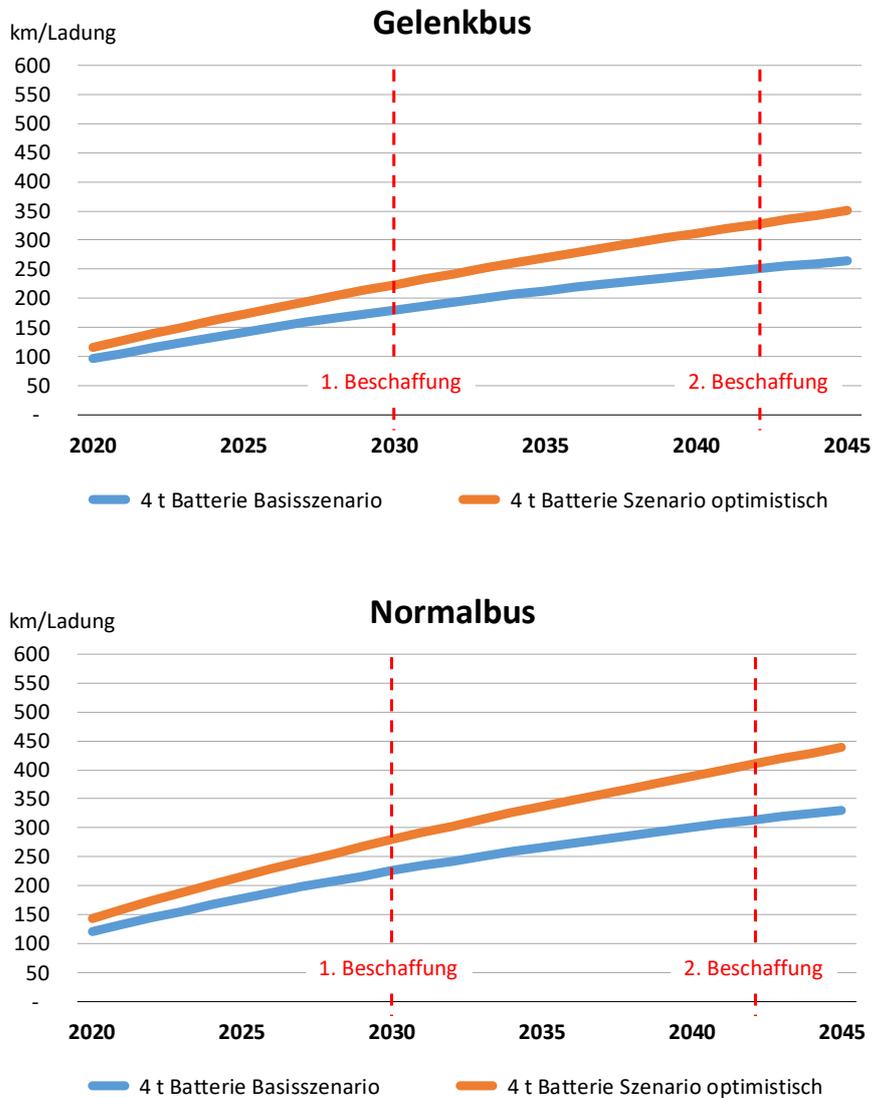
3.1.2. Depotlader

Depotlader sind batterieelektrische Busse, die nur relativ langsam geladen werden – typischerweise im Depot. Bei Depotladern ist die Batteriekapazität der kritischste Faktor für deren Einsatz. Sie bestimmt, ob eine Linie während der gesamten Betriebszeit nur mit einem Fahrzeug bedient werden kann oder ob Fahrzeuge im Laufe des Tages im Depot aufgeladen werden müssen, was natürlich zu zusätzlichem Aufwand und oft auch zu zusätzlichem Fahrzeugbedarf führen würde. Entsprechend brauchen Depotlader eine grosse, energieoptimierte Batterie. Die Batteriekapazität in einem Bus wird praktisch durch die Masse der Batterie beschränkt. Die Batteriemasse selbst wird beschränkt durch die maximale Achslast und die Beförderungskapazität: Mehr als 5 Tonnen darf eine Batterie für einen Normal- oder Gelenkbus nicht wiegen.

Depotlader von verschiedenen Herstellern sind seit mehreren Jahren auf dem Markt. Inzwischen haben auch die grossen Busersteller für die nächsten Jahre serienreife Modelle angekündigt. Da Batterien (noch) sehr teuer sind, sind Depotlader heute erst mit bis zu 360 kWh Batteriekapazität (ca. 4 Tonnen) auf dem Markt. Mit den Prognosen bezüglich Verbesserungen der Batterien wird den Depotladern von vielen Experten eine grosse Zukunft vorhergesagt.

In dieser Studie gehen wir für Normal- und Gelenkbusse ab 2020 von einer über die Jahre konstanten Batteriemasse von 4 t aus. Aufgrund der Batterieentwicklung nimmt die Kapazität mit der Zeit zu, was bedeutet, dass ein im Jahr 2020 beschaffter Bus eine deutlich geringere Reichweite hat als ein in den Jahren 2030 oder 2040 beschaffter Bus.

Abbildung 6: Entwicklung der realen Reichweite von Depotladern (Gelenk- und Normalbusse)



Grafik: INFRAS, Quellenangaben und Details siehe Annex 1

Depotlader benötigen keine Ladeinfrastruktur auf der Strecke. Busse werden im Depot mit einer Leistung von typischerweise 150 kWh pro Bus geladen. Für Gelenk- und Normalbusse wird dies aufgrund der steigenden Batteriekapazität ab 2030 schon zu relativ langen Ladezeiten führen, sodass gegebenenfalls in Zukunft eine höhere Ladeleistung benötigt wird. Mehr dazu in Kapitel 3.1.6.

3.1.3. Gelegenheitslader statisch

Gelegenheitslader sind batterieelektrische Busse, die schnell geladen werden - typischerweise an Endhaltestellen. Dafür brauchen diese Busse relativ kleine, schnellladefähige (also leistungsoptimierte) Batterien (s. Kapitel 3.1.1). In dieser Studie gehen wir von Batterien aus, die eine theoretische Reichweite von etwa 25 km pro Ladung erlauben. Mit steigender Batteriekapazität und sinkenden Kosten über die Zeit wird ein Gelegenheitslader auf dem neusten technischen Stand im Jahr 2030 also eine leichtere und vor allem viel günstigere Batterie haben als der vergleichbare Bus im Jahr 2020.

Bei Gelegenheitsladern ist meist die Standzeit an den Endhaltestellen der begrenzende Faktor für einen effizienten Einsatz. Die Fahrzeuge brauchen genügend Zeit an der Endhaltestelle zum Nachladen der Batterie. Je nach Streckenlänge und -profil beträgt diese Ladezeit 4-10 Minuten. Falls die Aufenthaltszeit an der Endhaltestelle immer zu kurz ist, um die Batterie zu laden, muss ein Zusatzkurs eingeführt werden, der jedem Fahrzeug an der Endhaltestelle jeweils eine längere Pause ermöglicht. Bei einer knappen Aufenthaltszeit nur während den Hauptverkehrszeiten (HVZ), kann eine grössere Batterie Abhilfe schaffen: es können dann 2 bis 3 Umläufe ohne Zwischenladung gefahren werden. Danach muss aber genügend Zeit an den Endhaltestellen zur Verfügung stehen, um die Batterien wieder ganz zu laden.

Neben einer Ladeinfrastruktur im Depot brauchen Gelegenheitslader auch Schnellladestationen mit 450 kW Ladeleistung an einer oder an mehreren Haltestellen. An diesen Stationen stellt der Bus z.B. mittels Pantographen eine Verbindung zur Ladestation her und wird während einigen Minuten geladen.

Ähnlich wie bei den Depotladern steigen immer mehr Hersteller in den Markt für solche Busse ein. Zurzeit sind noch unterschiedliche, untereinander nicht kompatible Kontaktsysteme im Angebot. Es laufen dazu aber Standardisierungsbemühungen sowohl der Standardisierungsorganisationen wie auch der Hersteller.

3.1.4. Kombi-Lader

Während die Namen Depotlader und Gelegenheitslader im Kontext von Elektrobussen häufig verwendet werden, ist die Bezeichnung «Kombi-Lader» nicht allgemein verständlich. Wir haben diesen Begriff gewählt, um einen batterieelektrischen Bus zu bezeichnen, der Eigenschaften des Depotladers und des statischen Gelegenheitsladers kombiniert. Kombi-Lader sind eigentlich Depotlader mit einer grossen, energieoptimierten Batterie, die aber zusätzlich an Endhaltestellen nachgeladen wird. Dies kann theoretisch über eine manuell hergestellte Steckerverbindung erfolgen, wie das von Postauto derzeit auf der Linie 342 Sarnen – Alpnach mit einem Standardbus getestet wird. Alternativ kann die Ladung analog zum Gelegenheitslader über einen Pantographen erfolgen.

Dieses Konzept wird als Alternative zu den «reinen» Formen auf Regional-Linien geprüft, wenn die totalen Tagesdistanzen eines Fahrzeugs nicht mit einem Depotlader erreichbar sind und für einen Einsatz von Gelegenheitsladern während Teilen des Tages zu wenig Ladezeit an den Endhaltestellen zur Verfügung steht. Damit im Betrieb aber nachgeladen werden kann, ist es nötig, dass z.B. ausserhalb der HVZ genügend Ladezeit zur Verfügung steht.

3.1.5. Gelegenheitslader dynamisch

Moderne Trolleybusse verfügen über eine Traktionsbatterie, die ähnlich spezifiziert ist wie die Batterie eines Gelegenheitsladers. Diese Batterien werden während der Fahrt über das Oberleitungsnetz geladen und erlauben es, den Bus auf rund 40 - 60% der Strecke⁷ ohne Oberleitung zu fahren. Der Anteil Oberleitung ist stark abhängig vom Streckenprofil und der resultierenden Länge eines zusammenhängenden fahrleitungslosen Abschnitts sowie der Nachlademöglichkeit im Falle von Umleitungen und Teilstreckenbetrieb. Damit können Kosten für die Oberleitung gespart und eine gewisse Flexibilität im Betrieb gewonnen werden. Die Batterie erweist sich ebenfalls als vorteilhaft beim Rekuperieren der Bremsenergie. Während der klassische Trolleybus diese Energie ins Oberleitungsnetz einspeist und die Energie nur genutzt werden kann, wenn ein anderer Bus im Netz sie gleichzeitig brauchen kann, speichern die modernen Trolleybusse die Energie in der Batterie und nutzen sie später selbst wieder.

Dynamische Gelegenheitslader benötigen etwa doppelt so viel Leistung aus dem Oberleitungsnetz als herkömmliche Trolleybusse, da sie neben der Energie zur Fortbewegung auch Energie zum Laden der Batterie benötigen. Das kann auf stark genutzten Streckenabschnitten dazu führen, dass die Stromeinspeisung in die Oberleitung verstärkt werden muss.

3.1.6. Anforderungen an die Stromversorgung zum Laden der Batterien

Depotlader werden typischerweise über Nacht im Depot geladen. Die heute am Markt erhältlichen Fahrzeuge haben eine Batteriekapazität von maximal um die 400 kWh. In dieser Studie gehen wir davon aus, dass in Zukunft aufgrund von Verbesserungen bei der Batterie Fahrzeuge mit bis zu 1200 kWh Batteriekapazität verfügbar sein werden. Bei einer Ladeleistung von 150 kW kann ein heutiger Depotlader in gut 2 Stunden geladen werden, während ein künftiger Bus mit 1200 kWh Kapazität eine Ladedauer von etwa 7 Stunden benötigen würde⁸. Um die aktuell am Markt verfügbaren Depotlader während der Nachtpause vollständig zu laden, braucht es eine Leistung von 50 – 100 kW pro Bus. In Zukunft werden mindestens die 150 kW pro Bus be-

⁷ Um als Trolley zugelassen zu werden, muss der Bus allerdings mehr als 50% der Strecke an der Oberleitung fahren.

⁸ Da die Batterie nicht vollständig entladen wird, sind es weniger als die theoretischen 2.67 bzw. 8 Stunden.

nötigt, je nach Betriebskonzept auch mehr. In dieser Studie gehen wir davon aus, dass ein Depot für Depotlader über eine Anschlussleistung von 150 kW pro Bus verfügt. Gemäss Aussagen der Stromnetzbetreiber CKW und ewl ist an den typischen Standorten von Busdepots eine Anschlussleistung von 5 MW im Allgemeinen möglich. Das bedeutet, dass rund 30 Busse gleichzeitig geladen werden können. In Zukunft muss man aber damit rechnen, dass ab 20 Depotlader pro Depot eine höhere Anschlussleistung erforderlich wird. Höhere Anschlussleistungen lösen in den Depots Infrastrukturanpassungen verbunden mit entsprechenden Kosten aus (Größenordnungen zu den Kosten für die Ladeinfrastrukturen sind dem Annex 2 zu entnehmen). Auf jeden Fall ist in einem Depot mit einer grösseren Depotlader-Flotte ein intelligentes Lademanagement vorzusehen, um den Leistungsbedarf zu minimieren.

Gelegenheitslader brauchen ebenfalls Ladeinfrastruktur in den Depots, damit die Busse mit voller Batterie ausfahren können. Aufgrund der relativ kleinen Batterien bei diesen Bussen ist die benötigte Ladeleistung pro Bus gering. Deshalb stellt auch eine grosse Gelegenheitslader-Flotte keine besonders hohe Anforderung an die Ladeleistung im Depot. Hingegen braucht jede Ladestation für die statischen Gelegenheitslader an den Endhaltestellen eine Leistung von rund 450 kW. Auf Linien mit langen Standzeiten an den Endhaltestellen (über 10 Minuten) könnte auch mit geringer Leistung geladen werden. Eine solche Leistung kann im Allgemeinen an Endhaltestellen zur Verfügung gestellt werden. Sehr entlegene Standorte könnten allenfalls problematisch sein. Schwierig kann es auch werden, wenn an zentralen Stellen viele Gelegenheitslader gleichzeitig laden müssen. Solche Situationen dürften aber am ehesten bei Bahnhöfen vorkommen, wo i.d.R. bereits eine sehr leistungsfähige Stromversorgung besteht.

Bei dynamischen Gelegenheitsladern wird der Leistungsbedarf ab Oberleitung gegenüber derjenigen von klassischen Trolleybussen etwa verdoppelt. Speziell auf Streckenabschnitten, die von mehreren Linien genutzt werden, kann so eine Verstärkung der Einspeiseleistung nötig werden. In solchen Fällen kann es sinnvoll sein, über kürzere Segmente nachzudenken, was zusätzliche Stabilität ins Oberleitungsnetz bringen würde.

3.1.7. Betriebliche Aspekte

Im Vergleich zu mit Diesel oder Biotreibstoffen betriebenen Bussen stellen insbesondere Depotlader höhere Anforderungen an die Überwachung des Ladestands der Batterien. Die Fahrzeuge sind mit entsprechenden Assistenzsystemen auszurüsten, welche dem Fahrpersonal und der Leitstelle Informationen zur verbleibenden Reichweite und somit zur betrieblichen Disposition der Fahrzeuge liefern. Diese Systeme verteuern tendenziell die Fahrzeugkosten.

3.1.8. Anforderungen an Depots und Werkstätte

Batteriebusse könnten aufgrund gesetzlicher Vorschriften je nach Situation baulichen Anpassungsbedarf in den Depots und Werkstätten auslösen. Mögliche Themen sind Arbeitsplatzsicherheit (z. Bsp. für Dacharbeitsplätze) sowie Brandschutz (u.a. auch im Zusammenhang mit der Lagerung von Batterien). Wie diese Massnahmen konkret aussehen und welche Kosten sie auslösen werden, ist heute noch nicht bekannt.

Grundsätzlich verlangen Batteriebusse auch andere Spezialwerkzeuge bzw. Diagnosegeräte (inkl. Schulungen) als die Dieselbusse. Die entsprechenden Kosten dürften sich jedoch über eine Gesamtflotte betrachtet in Grenzen halten. Zudem unterscheiden sie sich kaum massgebend zwischen den verschiedenen Typen von Batteriebussen.

3.2. Brennstoffzellenbusse

Brennstoffzellenfahrzeuge verfügen neben der Brennstoffzelle, die durch die Oxidation von Wasserstoff zu Wasser Strom generiert, auch über eine Batterie, welche im Fahren durch die Brennstoffzelle geladen wird. Die Batterie wird benötigt, weil die Leistung der Brennstoffzelle die Verbrauchsspitzen beim Anfahren und Beschleunigen nicht decken könnte. Weil die Batterie relativ klein ist und während des Beschleunigens und des Rekuperierens mit grossen Strömen belastet wird, muss sie schnellladefähig sein.

Die Reichweite von Brennstoffzellenbussen beträgt in Zukunft pro Betankung mit Wasserstoff ca. 400 – 800 km, so dass einmal tägliches Betanken im Allgemeinen ausreichen sollte.

Der grösste Teil des heute benutzten Wasserstoffs wird auf Basis von fossilen Energieträgern durch Cracking hergestellt. Dieser Teil wird aus unserer Studie ausgeschlossen, weil er nicht erneuerbar ist. Erneuerbarer Wasserstoff kann durch Elektrolyse von Wasser mit erneuerbarem Strom produziert werden. Der Wirkungsgrad der Elektrolyse in für Wasserstofftankstellen typischen Anlagen liegt bei etwa 60%. Da die Kühlung und Komprimierung des Wasserstoffes für die Speicherung im Drucktank der Busse ebenfalls Energie benötigt, liegt der Gesamtwirkungsgrad der Herstellung von Wasserstoff aus Strom für den Einsatz als mobiler Treibstoff bei rund 50%.

Aufgrund des energetischen Wirkungsgrads der Brennstoffzelle, der im Bereich von 60-70% liegt, verbraucht ein Brennstoffzellenbusses beim Betrieb rund ein Drittel mehr Energie als ein vergleichbarer Batteriebus. Hier wird eine kontinuierliche Verbesserung erwartet, doch wird der Energieverbrauch von Brennstoffzellenbusse trotzdem immer über dem von Batteriebussen liegen.

In der Schweiz gibt es derzeit nur einzelne Wasserstofftankstellen. Die Anschaffung von Brennstoffzellenbussen würde demnach voraussetzen, dass auf dem Gebiet des VVL mindestens eine Wasserstofftankstelle gebaut wird.

Brennstoffzellenbusse wurden in einigen Pilotprojekten getestet. Die Kosten der Wasserstoffproduktion und der Brennstoffzelle selbst, vor allem auch im Zusammenhang mit der noch ziemlich kurzen Lebensdauer, waren bisher das vielleicht grösste Hindernis für einen breiteren Einsatz. Hyundai hat 2018 angekündigt, zwischen 2019 und 2023 eine Serie von 200 Brennstoffzellen-LKW in der Schweiz in Verkehr zu setzen. Auch haben verschiedene Bushersteller in Europa und Asien haben inzwischen für 2020 erste Kleinserien in Aussicht gestellt. Etwas im Widerspruch zu der entsprechenden Ankündigung von Mercedes stehen Aussagen des Mercedes Vorstands Dieter Zetsche (in Automobil Produktion von 28.3.2017), wonach Brennstoffzellenfahrzeuge auch in Zukunft keine wichtige Rolle spielen dürften, weil sich die Batteriefahrzeuge so rasch entwickeln würden.

Ein Brennstoffzellenbus benötigt neben dem Brennstoffzellenmodul einen Wasserstofftank, ein Kühlsystem sowie ein Luft-Kompressor-System, das die Brennstoffzellen mit der für die Reaktion benötigten Luft versorgt.

Die im Fahrzeugbereich am häufigsten verwendeten Brennstoffzellen-Module sind sogenannte «polymer electrolyte membrane fuel cell» (PEMFC). Die typische elektrische Leistung solcher Module für schwere Nutzfahrzeuge liegt im Bereich von 60-100 kW, was in etwa der durchschnittlich benötigten Leistung eines Normal- oder Gelenkbusses entspricht. Solche Module wiegen zwischen ca. 250 und ca. 300 kg. Vor wenigen Jahren kosteten die Brennstoffzellen-Module für einen Normalbus noch rund 600'000 Euro. Heute liegen sie gemäss Angaben von Ballard in der Grössenordnung von 200'000 Euro. Ziel von Ballard ist, diese Kosten noch einmal zu halbieren.

Die Herstellung eines Brennstoffzellensystems für einen E-Bus verursacht Treibhausgasemissionen in der Grössenordnung der Herstellung einer Gelegenheitslader-Batterie von 60 kWh. Die Lebensdauer von Brennstoffzellen-Modulen liegt heute im unteren Bereich von typischen Batterielebensdauern. Auch diesbezüglich sind deutliche Fortschritte erforderlich, damit Brennstoffzellenbusse gegenüber von Batteriebusen konkurrenzfähig werden.

3.3. Bio- und synthetische Treibstoffe (Biodiesel / Biogas / PtX)

Biodieselfahrzeuge unterscheiden sich technisch nur unwesentlich von herkömmlichen Dieselfahrzeugen. Die notwendigen Unterschiede hängen zudem vom Typ des zu verwendenden Biodiesels ab. Synthetische Treibstoffe können die entsprechenden fossilen Komponenten eins zu eins ersetzen und brauchen keine Änderung bei den Fahrzeugen.

Über 99% des zurzeit global produzierten Biodiesels stammen direkt aus den Früchten von Ölpflanzen. Solche Treibstoffe sind in der Schweiz bisher nicht im Einsatz, weil sie nicht von der Mineralölsteuerbefreiung profitieren können und darum kein Anreiz für deren Verwendung besteht. Heute zum Einsatz kommt in der Schweiz praktisch nur Biodiesel aus gebrauchtem Speiseöl. Der grösste Teil des heute verfügbaren Biodiesels aus gebrauchtem Speiseöl wird durch Veresterung der pflanzlichen Öle hergestellt und FAME (fatty acid methyl ester) genannt. FAME ist, anders als fossiler Diesel, kein reiner Kohlenwasserstoff, sondern ein Fettsäuremethylester, der wegen den Sauerstoffatomen in seiner Molekülstruktur hygroskopisch und leicht korrosiv ist und einen etwas tieferen Energieinhalt hat als fossiler Diesel. Nicht speziell deklarierter Diesel an der Tankstelle darf gemäss der «Dieselnorm» (EN 590) bis zu 7% FAME enthalten. In dieser Beimischung kann es in jedem normalen Dieselmotor verwendet werden. Einige Hersteller von schweren Nutzfahrzeugen bieten aber schon länger Modelle an, die auch mit 100% FAME betrieben werden können. Eine Alternative zur Veresterung von Pflanzenöl ist deren Hydrierung, also eine Umwandlung der Fettsäuren in reine Kohlenwasserstoffe durch Hydrierung mit Wasserstoff. Grundsätzlich können die gleichen Rohstoffe verwendet werden wie für die FAME Produktion. Bei so hergestelltem Biodiesel spricht man von hydriertem Pflanzenöl oder HVO (hydrogenated vegetable oil). HVO ist chemisch sehr ähnlich zu fossilem Diesel und darf gemäss Dieselnorm in beliebigen Mengen (also auch zu 100%) in Diesel enthalten sein.

Bis 2030 wird erwartet, dass auch synthetisch hergestelltes Biodiesel aus Lignozellulosepflanzen, Altholz oder biogenen Abfällen auf dem Markt sein wird, von dem keine Landnutzungs Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion ausgeht. Diesen Treibstoff nennt man nach seinem Herstellpfad «Biomass to Liquid» (BtL)-Diesel. BtL-Diesel wird in einem Syntheseprozess hergestellt und hat direkt vergleichbare Eigenschaften mit fossilem Diesel.

Biodiesel benötigt eine separate Tankinfrastruktur, um sicherzustellen, dass der Treibstoff nicht mit fossilem Diesel vermischt wird. Diese Infrastruktur ist, wie schon die Fahrzeuge, technisch sehr ähnlich wie die Tankinfrastruktur für normalen Diesel.

Biodiesel ist im Moment eine der wenigen Möglichkeiten, die THG-Emissionen von Langstreckentransporten mit schweren Nutzfahrzeugen zu reduzieren. Biogas und Wasserstoff brauchen für diese Anwendung zu grosse und zu schwere Tanks, Batteriefahrzeuge werden dafür noch lange eine zu geringe Reichweite pro Ladung und zu lange Ladezeiten aufweisen und eine flächendeckende Stromversorgung für Oberleitungs-LKW wird, aufgrund der hohen Kosten, höchstens langsam aufgebaut. So ist zu erwarten, dass die Entwicklung von und auch die Nachfrage nach Biodiesel-LKW weiter steigen werden. Auch die Produktion von abfallbasiertem Biodiesel wird nach 2020 steigen. Dies nicht zuletzt, weil die EU in der neuen «Renewable Energy Directive» (RED) vorsieht, dass die Beimischquoten für diese Treibstoffe kontinuierlich

erhöht werden müssen. Aufgrund der beschränkten Menge an verfügbaren Rohstoffen für solchen Biodiesel muss aber damit gerechnet werden, dass die Produktion nicht beliebig steigen kann.

In der RED der EU gibt es bereits Anreize zur Nutzung von Biodiesel für Anwendungen, für die praktisch keine Alternativen bestehen (Flugverkehr, Hochseeschiffe, ggf. langstrecken-LKW). Ähnliche Anreize dürften auch in der Schweiz geschaffen werden. Für Stadtbusse könnte das bedeuten, dass Biodiesel ab den 2030er Jahren verteuert wird und die entsprechenden Fahrzeuge langsam vom Markt verschwinden werden.

Biogas wird durch anaerobe Vergärung von Biomasse, üblicherweise Pflanzen- und Lebensmittelabfälle, hergestellt. Nach einer Reinigung des Produktes besteht Biogas praktisch vollständig aus Methan und kann als 1:1-Ersatz von Erdgas verwendet werden.

Biogasfahrzeuge und Tankstellen sind vielerorts bereits in Betrieb. Die Fahrzeuge weisen jedoch im Vergleich zu Biodieselfahrzeugen eine deutlich geringere Energieeffizienz auf. Zudem wird bei der Produktion des Biogases wie auch beim Betanken und im Betrieb der Fahrzeuge Methan, ein starkes Treibhausgas, emittiert. Darum verursachen Biogasfahrzeuge etwas höhere THG-Emissionen als Biodieselfahrzeuge. Dafür schneiden sie bezüglich Stickoxyd- und Partikelemissionen deutlich besser ab und sind auch weniger laut.

Wie schon der Biodiesel basiert auch Biogas auf beschränkt verfügbaren Rohstoffen. Um das Angebot an Biogas zu erhöhen, müsste mehr Aufwand für die separate Sammlung von biogenen Haushaltsabfällen getrieben werden. Das wirkt sich einerseits auf die Kosten des Treibstoffes aus, andererseits verschlechtert es auch die Klimabilanz von Biogasnutzung, weil ein Ausbau dieser Sammlungen immer auch zusätzliche Transporte bedeutet.

Synthetische Treibstoffe werden aus CO₂ und Wasserstoff hergestellt. Das CO₂ wird dabei aus der Luft gewonnen, der Wasserstoff aus Elektrolyse. Die Herstellung von synthetischen Treibstoffen braucht viel (erneuerbaren) Strom, da der energetische Gesamtwirkungsgrad der Produktion in der Grössenordnung von 40% liegt. Im Kontext einer Umstellung des Energiesystems auf CO₂-freie Energie ohne Kernkraft ist aber umso mehr geboten, Energie möglichst effizient zu verwenden. Da die Stromproduktion in Zukunft stärker auf Wind- und Solarenergie setzen wird, wird aber die Leistung der gesamten Stromerzeugung zeitlich nicht mehr so konstant sein wie bisher. Mit anderen Worten wird es Zeiten geben, in denen zu viel Strom zur Verfügung steht und Zeiten, in denen Strom eher knapp sein wird. Wenn zu viel Strom zur Verfügung steht, ist er entsprechend günstig und ein schlechter Wirkungsgrad bei der Energieumwandlung ist in diesen Zeiten weniger problematisch. Darum wurde propagiert, dass dieser günstige Strom dazu verwendet werden könnte, synthetische Treibstoffe herzustellen. So einleuchtend diese Überlegung auf den ersten Blick scheint, hat sie doch ihre Schwierigkeiten: Zeiten mit zu viel Strom aus erneuerbaren Quellen kommen insgesamt nicht sehr oft vor. Das heisst, dass

eine Produktionsanlage, die nur diesen «Überschussstrom» verwerten wollte, vielleicht 20% der Zeit laufen würde und den Rest des Jahres stillsteht. Damit würden sich die Investitionen in so eine Anlage nicht oder höchstens sehr langsam amortisieren lassen. Aus diesem Grund wird erwartet, dass die Preise für synthetische Treibstoffe mittelfristig sehr hoch bleiben werden.

3.4. Plug-In-Hybrid

Plug-In-Hybride können technisch sehr unterschiedliche Fahrzeuge sein. Gemeinsam ist allen, dass sie einen Elektroantrieb und eine Traktionsbatterie haben, die am Stromnetz aufgeladen werden kann. Wie bei batterieelektrischen Bussen bestimmt die Grösse der Batterie, zusammen mit der Frequenz und Dauer der Ladevorgänge am Netz, wie gross der Anteil des Betriebs mit Netzstrom sein wird. Im Unterschied zu reinen batterieelektrischen Bussen verfügen Plug-In-Hybride über einen zusätzlichen Energiewandler, der einen Treibstoff in mechanische oder elektrische Energie umwandelt. Dieser Energiewandler kann ein Verbrennungsmotor sein, der direkt eine Achse antreibt. Es kann sich auch um einen Verbrennungsmotor handeln, der einen Generator zum Nachladen der Batterie antreibt oder um eine Brennstoffzelle, die ebenfalls Strom zum Laden der Batterie erzeugt. In dieser Studie betrachten wir Brennstoffzellenfahrzeuge allerdings separat und zählen diese ausdrücklich nicht zur Kategorie Plug-in-Hybride.

So gehen wir davon aus, dass ein Elektroantrieb mit einer Batterie mit einem Diesel- oder Biodieselantrieb kombiniert wird. Heute verfügbare Plug-in-Hybrid-Busse verfügen über eine relativ kleine Batterie (um 60 kWh), die jeweils im Depot geladen wird. Das führt dazu, dass damit nur ein sehr kleiner Teil der Fahrleistung (20-30 km) mit Strom vom Netz erbracht werden kann. Denkbar sind auch schnellladefähige Fahrzeuge, die an Gelegenheitsladestationen nachgeladen werden können, sowie Depotlader-Hybride mit grösseren Batterien. Mit diesen beiden Systemen kann ein hoher Anteil der Fahrleistung mit Netzstrom erbracht werden. Der Dieselmotor wäre im Grenzfall eigentlich nur noch ein Notaggregat.

4. Zweckmässige Einsatzfelder im Kanton Luzern

Wie im Kapitel 3 ausgeführt, fokussiert die E-Bus-Strategie auf Batteriebusse. Anhand von Beispiellinien werden die drei sich bezüglich Ladekonzept unterscheidenden Optionen Depotlader, Gelegenheitslader statisch und Gelegenheitslader dynamisch (IMC) untersucht und mit dem Dieselbus (konventionell und Hybrid) verglichen.

Die Betrachtung erfolgt für einen E-Buseinsatz ab 2030; ab diesem Zeitpunkt werden Depotlader gemäss heutigen Annahmen Reichweiten aufweisen, welche den Einsatz auf geeigneten Linien ohne zusätzlichen Fahrzeugbedarf ermöglichen. Aus den Ergebnissen für den längerfristigen Horizont ab 2030 ist dann abzuleiten, ob der Einsatz von E-Bussen bereits vor 2030 als Gelegenheitslader (dynamisch oder statisch) Sinn macht. Dies wäre der Fall, wenn diese Optionen auch langfristig besser abschneiden als der Depotlader. Andernfalls, d.h. wenn langfristig der Depotlader zweckmässiger ist, sollte kurzfristig nicht in Ladeinfrastruktur entlang der Linien investiert werden.

Bei der Kostenbetrachtung werden im Zusammenhang mit der noch unsicheren Entwicklung der Batterien zwei Szenarien berücksichtigt, welche in der nachfolgenden Abbildung beschrieben sind.

Abbildung 7: Spezifizierung der zwei berücksichtigten Szenarien zur Entwicklung der Batterien

	Basisszenario	Optimistisches Szenario
Annahmen zu Energiedichte und Preise im Ausgangszustand 2020 <ul style="list-style-type: none"> ▪ Depotlader-Batterien (hohe Energiedichte) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Energiedichte ▪ Preis ▪ Gelegenheitslader-Batterien (hohe Leistung) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Energiedichte ▪ Preis 	<p style="text-align: center;">100 Wh/kg 800 CHF/kWh</p> <p style="text-align: center;">80 Wh/kg 1'600 CHF/kWh</p>	<p style="text-align: center;">120 Wh/kg 750 CHF/kWh</p> <p style="text-align: center;">100 Wh/kg 1'200 CHF/kWh</p>
Lebensdauer der Batterie	Mittelfristig: 6 Jahre Langfristig: 6 Jahre	Mittelfristig: 6 Jahre Langfristig: 12 Jahre
Nutzung der Batterie/Entladungsgrad	60% (SOC 20% - 80%)	60% (SOC 20% - 80%)
Energieverbrauch E-Bus <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gelenkbus ▪ Normalbus ▪ Midibus Dynamisierung, u.a. zur Berücksichtigung von Effizienzsteigerungen bei den Nebenaggregaten	<p style="text-align: center;">2.5 kWh/km 2.0 kWh/km 1.8 kWh/km</p> <p style="text-align: center;">0.5% Reduktion pro Jahr</p>	<p style="text-align: center;">2.5 kWh/km 2.0 kWh/km 1.8 kWh/km</p> <p style="text-align: center;">1% Reduktion pro Jahr</p>

4.1. Beispiellinien

Die Beispiellinien unterscheiden sich einerseits nach Einsatzfeld und andererseits nach Busgrösse. Bezüglich Einsatzfeldern werden vier Cluster unterschieden:

- Stadt-Linien
- Agglomerations-Linien
- Regional-Linien
- Quartier-Linien

Die folgende Tabelle 1 zeigt die untersuchten Linien.

Tabelle 1: Untersuchte Fallbeispiele, s. auch Abbildung 8

Cluster: Einsatzfeld	Linie Nr.	Linienführung	Bustyp	Linien- länge	Taktintervall Montag - Freitag
Stadt-Linie	60.020	Horw Technikumstrasse – Ennethorw – Zentrum – Luzern Bahnhof	Gelenkbus	6 km	Grundtakt: 15 Min. HVZ: 7.5 Min. auf Teilstrecke
Agglo-Linie	60.040	Littau Bahnhof – Bahnhof Süd – Flugzeugwerke – (Waldibrücke)	Gelenkbus	7 km (10 km)	15 Min.
Agglo-Linie	60.025/26	Gottlieben – Meggen Pius- kirche – Luzern Brüelstrasse – Adligenswil Dorf – Ebikon Ottigenbühl	Normalbus	16 km	30 Min.
Regional-Linie	60.061	Luzern – Ruswil – Ettiswil	Gelenkbus	32 km	30 Min.
Regional-Linie	60.271	Willisau – Schötz – Nebikon – Dagmersellen	Normalbus	14 km	Grundtakt: 60 Min. HVZ: 30 Min.
Quartier-Linie	60.011	Kriens Dattenberg – Luzern Eichhof – Bahnhof	Midibus	3 km	Grundtakt: 30 Min. HVZ: 15 Min.

Bemerkungen

- Die Definition der Linientypen «Agglo-Linie» und «Regional-Linie» kann auch auf die Region Sursee, welche Agglomerationscharakter aufweist, angewendet werden (z. Bsp. Linie 60.086 als Agglo-Linie und Linie 60.085 als Regional-Linie).
- Das grösste Gefäss, welches zur Umstellung von Diesel- auf E-Bus in Frage kommt, sind Gelenkbusse. Doppelgelenkbusse werden bereits heute (und auch künftig) nur als Trolleybusse bzw. mit IMC-Technologie verkehren.

4.1.1. Stadt-Linie 60.020 (Gelenkbus)

Spezifikation

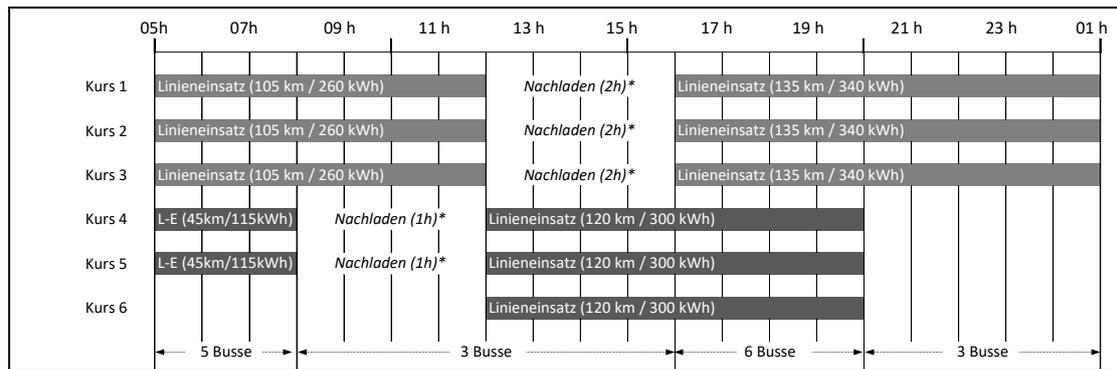
Tabelle 2: Spezifikation der drei E-Bus-Varianten für die Linie 60.020

Gelegenheitslader dynamisch IMC	Gelegenheitslader statisch	Depotlader
<ul style="list-style-type: none"> 75 kWh-Batterie Oberleitung bestehend: 1.4 km Oberleitung neu: 2.0 km ⇒ 60% der Strecke elektrifiziert 	<ul style="list-style-type: none"> 75 kWh-Batterie 4 Ladestationen (450 kW): Bahnhof, an den beiden Linienenden Ennethorw, Technikumstrasse sowie Horw Zentrum (Endpunkt Verstärkungskurse HVZ) Zusätzlicher Fahrzeugumlauf in HVZ am Morgen aufgrund Ladevorgänge erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> 4 t Batterie* max. Tageseinsätze: ca. 310 km Reichweite pro Ladung: 180 km (Basisszenario) bzw. 220 optimistisches Szenario keine zusätzlichen Busse zum Nachladen erforderlich trotz noch ungenügender Reichweite für Abdeckung max. Tagesleistungen; Fahrzeugaustausch über HVZ-Verstärker

* Bei Gelegenheitsladern gehen wir davon aus, dass die Energiekapazität der Batterie über die Zeit konstant bleiben wird. Bei Depotladern hingegen wird die Masse konstant gehalten und damit die Energiekapazität in Zukunft steigen. Deshalb sind die Batteriegrößen nicht mit denselben Eigenschaften angegeben.

Tabelle INFRAS.

Abbildung 9: Fahrzeugeinsatzkonzept für Variante Depotlader Linie 60.020



* angenommene Ladeleistung im Depot: 150 kW

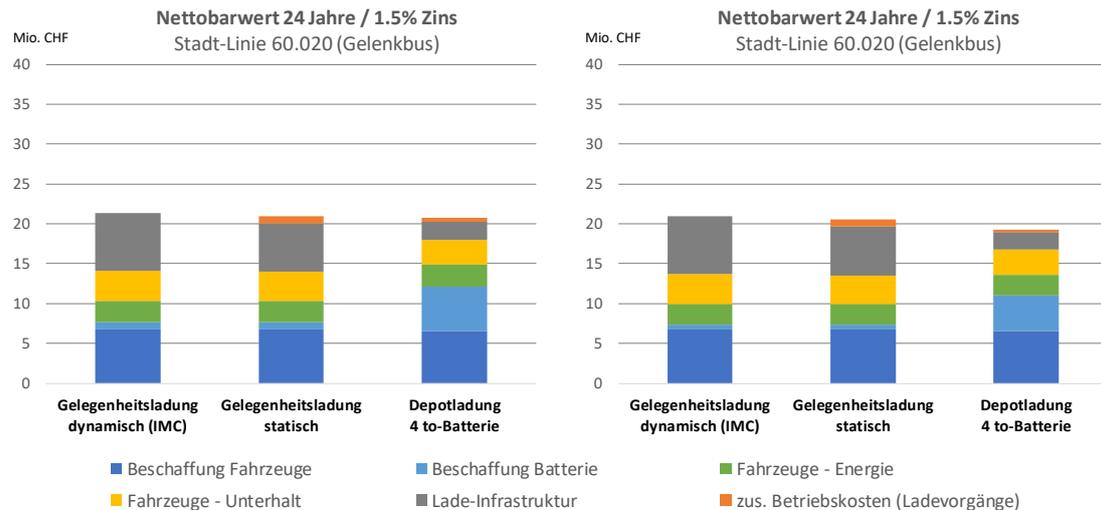
Grafik INFRAS.

Auswirkungen auf die relevanten Kostenblöcke

Abbildung 10: Teilkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030

Basisszenario

Szenario «Optimistische Annahmen Batterie»



Grafik INFRAS

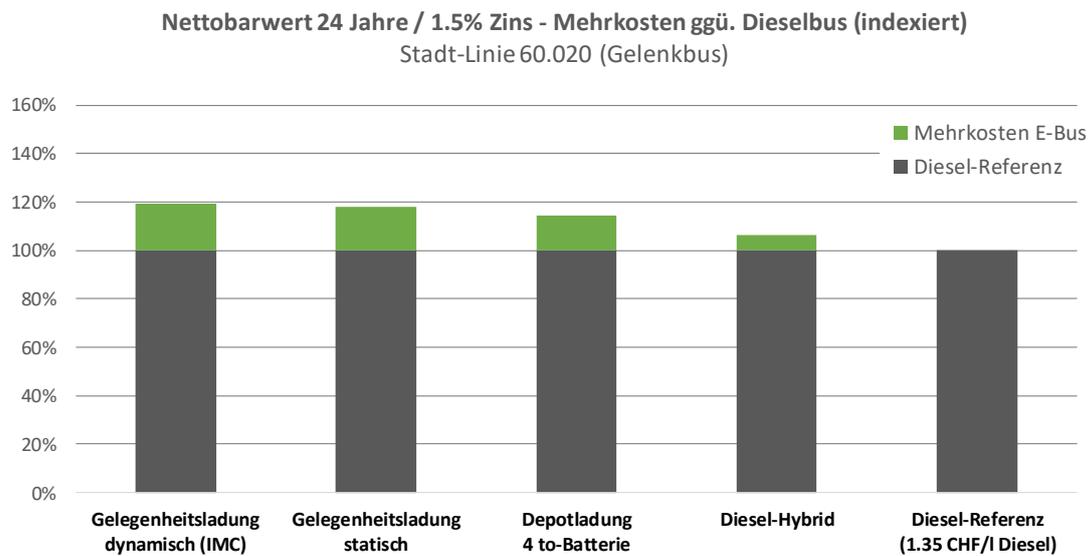
Erkenntnisse für den Zeithorizont 2030:

- Alle drei E-Bus-Varianten liegen kostenmässig nahe beisammen.
- Bei optimistischen Annahmen zur Batterieentwicklung (höhere Energiedichte, tiefere Preise) schneidet der Depotlader tendenziell besser ab als die Gelegenheitslader, weil der Fahrzeug-austausch zum Nachladen der Batterien über die HVZ-Verstärker-Kurse ohne massgebenden betrieblichen Mehraufwand erfolgen kann.
- Das Ergebnis bei der Variante IMC ist abhängig vom Anteil des neu zu erstellenden Oberleitungsnetzes. Sind bereits rund 50% der erforderlichen Oberleitungsnetzlänge zum Nachladen der Batterien vorhanden, schneidet der IMC kostenmässig gleich ab wie der Depotlader. Eine Minimierung der Oberleitungsinvestitionen kann beispielsweise auch durch die Verknüpfung mit einem bereits vollständig elektrifizierten Trolleybus-Linienast erreicht werden.
- Der Gelegenheitslader statisch wäre im Basisszenario am günstigsten, wenn statt vier nur zwei Ladestationen nötig wären. Im optimistischen Szenario lägen der statische Gelegenheitslader und der Depotlader preislich sehr nahe beieinander. Daraus lässt sich folgern, dass sich ein Liniensplitting mit unterschiedlichen Linienenden sowie HVZ-Verstärkerkurse nur auf einem Teilabschnitt ungünstig auf das Konzept Gelegenheitslader statisch auswirkt.

Mehrkosten gegenüber Diesel

E-Busse auf der Linie 60.020 sind bezüglich Linienvollkosten rund 15% - 20% teurer gegenüber dem Dieselbus (bei Dieselpreis für konzessionierten Betrieb von 1.35 CHF/l). Bei einem Dieselpreis von 2.80 CHF/l wären Dieselbus und E-Busse mit Depotladung ungefähr gleich teuer.

Abbildung 11: Vollkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030 (Szenario «Optimistische Annahmen Batterie»)



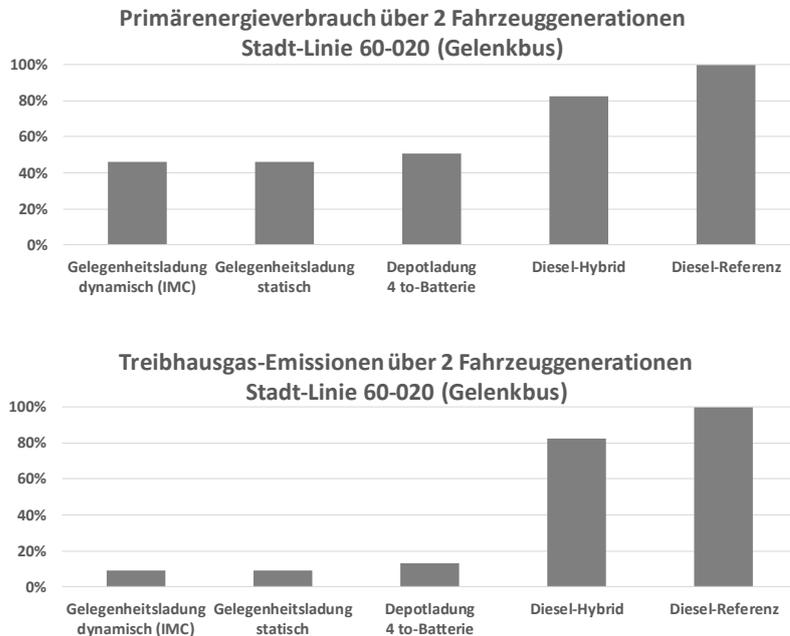
Annahme: die betrachteten Teilkosten (entspricht in der Grafik den Mehrkosten E-Bus = grüner Anteil) machen bei der Diesel-Referenzvariante ca. 40% der Vollkosten (inkl. Varianten unabhängige Kosten für Fahrpersonal, allg. Overhead etc.) aus.

Grafik INFRAS.

Ökologische Auswirkungen

Wie die Abbildung 12 zeigt, lassen sich mit einem E-Buseinsatz auf der Linie 60.020 der Primärenergiebedarf um 50 – 60% und die Treibhausgas-Emissionen sogar um 90% gegenüber den heute eingesetzten Dieselbussen reduzieren. Zwischen den drei E-Bus-Varianten bestehen keine grossen Unterschiede. Tendenziell schneidet der Depotlader aufgrund der grösseren Batterien etwas weniger gut ab verglichen mit den Gelegenheitsladern.

Abbildung 12: Auswirkungen von E-Bussen auf Primärenergiebedarf und Treibhausgas-Emissionen



Grafik INFRAS.

4.1.2. Aggo-Linie 60.040 (Gelenkbus)

Spezifikation

Tabelle 3: Spezifikation der drei E-Bus-Varianten für die Linie 60.040

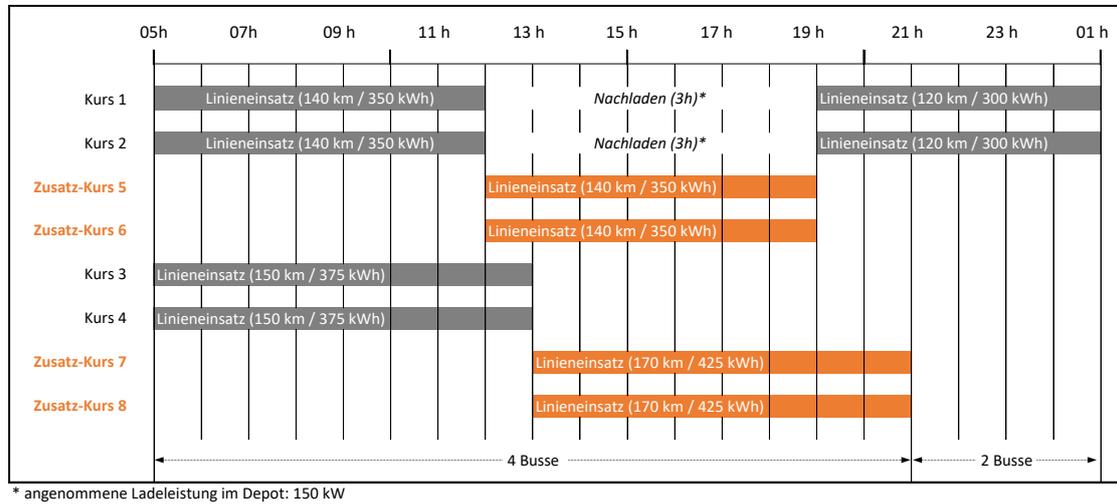
Gelegenheitslader dynamisch IMC	Gelegenheitslader statisch	Depotlader
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 75 kWh-Batterie ▪ Oberleitung bestehend: 0.5 km Oberleitung neu: 5.0 km ⇒ 57% der Strecke elektrifiziert 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 120 kWh-Batterie* ▪ 2 Ladestationen (450 kW): je eine Littau Bahnhof und Flugzeugwerke (für Abend- und Sonntagbetrieb) ▪ Zusätzlicher Fahrzeugumlauf Montag - Samstag aufgrund Ladevorgänge erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 4 t Batterie** ▪ max. Tageseinsätze: ca. 400 km ▪ Reichweite pro Ladung: 180 km (Basisszenario) bzw. 220 optimistisches Szenario ▪ Im Zeithorizont 2030 4 zus. Busse, im Zeithorizont 2042 noch zwei zus. Busse zum Nachladen erforderlich

* Eine 75 kWh-Batterie würde theoretisch reichen, wenn an beiden Linienenden eine Ladestation vorhanden ist (Reichweite 22 km, Linienlänge 10 km). Die Reichweite einer Batterieladung sollte aber mindestens einen Umlauf ermöglichen für den Fall, dass Ladestation an einem Linienende ausfällt.

** Bei Gelegenheitsladern gehen wir davon aus, dass die Energiekapazität der Batterie über die Zeit konstant bleiben wird. Bei Depotladern hingegen wird die Masse konstant gehalten und damit die Energiekapazität in Zukunft steigen. Deshalb sind die Batteriegrößen nicht mit denselben Eigenschaften angegeben.

Tabelle INFRAS.

Abbildung 13: Fahrzeugeinsatzkonzept für Variante Depotlader für die Linie 60.040



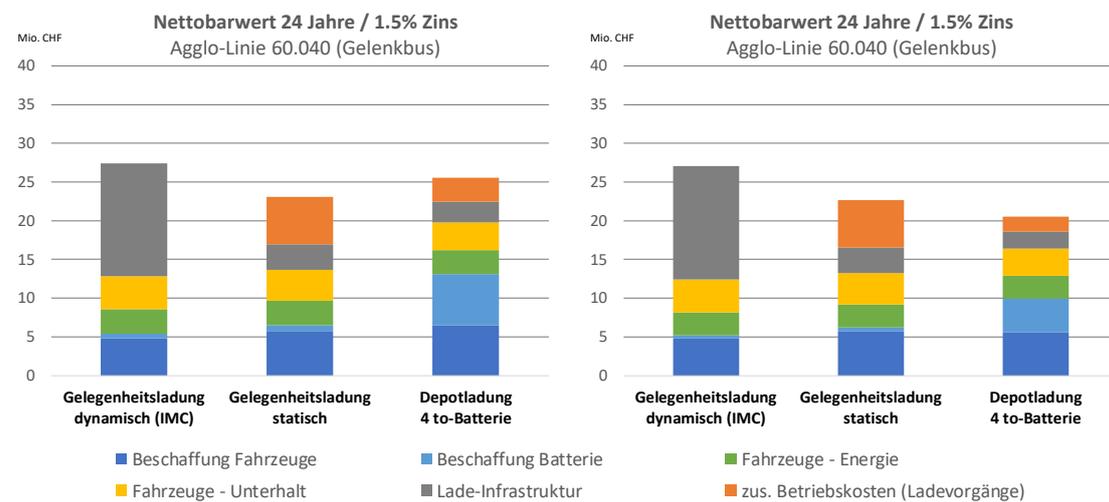
Grafik INFRAS.

Auswirkungen auf die relevanten Kostenblöcke

Abbildung 14: Teilkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030

Basisszenario

Szenario «Optimistische Annahmen Batterie»



Grafik INFRAS

Erkenntnisse für den Zeithorizont 2030:

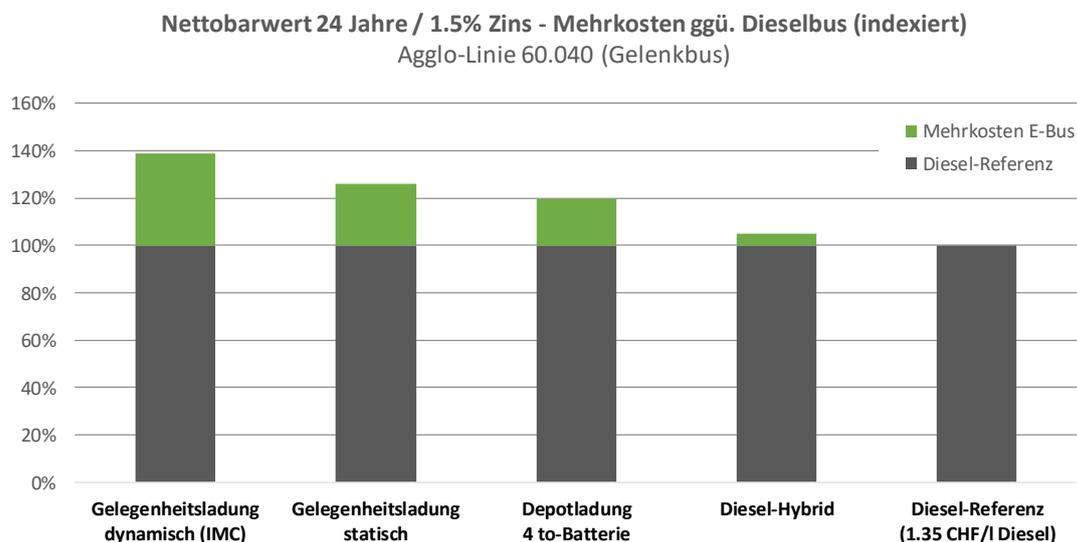
- Der Gelegenheitslader dynamisch (IMC) ist in beiden Szenarien aufgrund der hohen Fahrleistungsinvestitionen die teuerste Variante.

- Im Basisszenario schneidet der Gelegenheitslader statisch besser ab als der Depotlader, obwohl Montag – Samstag ein zusätzlicher Fahrzeugumlauf zum Nachladen der Batterien am Bahnhof Littau nötig ist. Der Depotlader löst in diesem Szenario im Zeithorizont 2030 vier zusätzliche Busse und ab 2042 immer noch zwei zusätzliche Busse aus.
- Bei optimistischen Annahmen zur Batterieentwicklung (höhere Energiedichte, tiefere Preise) kippt das Ergebnis und der Depotlader schneidet besser ab als der Gelegenheitslader statisch, weil aufgrund der grösseren Reichweiten weniger zusätzliche Busse zum Nachladen resultieren (im Horizont 2030 zwei zusätzliche Busse und im Horizont 2042 ein zusätzlicher Bus).

Mehrkosten gegenüber Diesel

Die Variante IMC ist bezüglich Linienvollkosten auf der Linie 60.040 mit rund 40% Mehrkosten massiv teurer als der Dieselbus. Die Varianten Gelegenheitslader statisch und Depotlader sind rund 20% - 25% teurer (bei Dieselpreis für konzessionierten Betrieb von 1.35 CHF/l). Bei einem Dieselpreis von 3.00 CHF/l wären Dieselbusse und E-Busse mit Depotladung ungefähr gleich teuer.

Abbildung 15: Vollkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030 (Szenario «Optimistische Annahmen Batterie»)



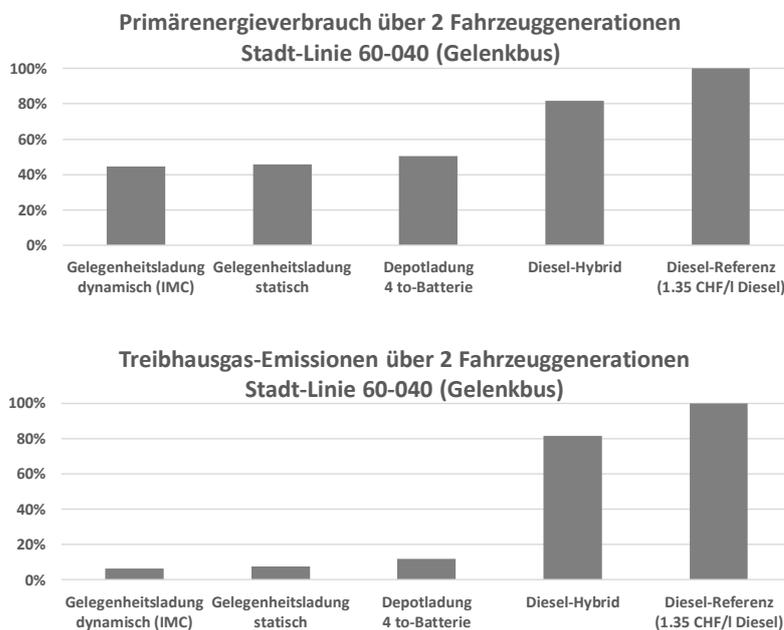
Annahme: die betrachteten Teilkosten (entspricht in der Grafik den Mehrkosten E-Bus = grüner Anteil) machen bei der Diesel-Referenzvariante ca. 40% der Vollkosten (inkl. Varianten unabhängige Kosten für Fahrpersonal, allg. Overhead etc.) aus.

Grafik INFRAS.

Ökologische Auswirkungen

Wie die Abbildung 16 zeigt, lassen sich mit einem E-Buseinsatz auf der Linie 60.040 der Primärenergiebedarf um 50 – 60% und die Treibhausgas-Emissionen sogar um 90% gegenüber den heute eingesetzten Dieselnissen reduzieren. Zwischen den drei E-Bus-Varianten bestehen keine grossen Unterschiede. Tendenziell schneidet der Depotlader aufgrund der grösseren Batterien etwas weniger gut ab verglichen mit den Gelegenheitsladern.

Abbildung 16: Auswirkungen von E-Bussen auf Primärenergiebedarf und Treibhausgas-Emissionen



Grafik INFRAS.

4.1.3. Agglo-Linie 60.025/26 (Normalbus)

Spezifikation

Tabelle 4: Spezifikation der zwei E-Bus-Varianten für die Linie 60.025/26

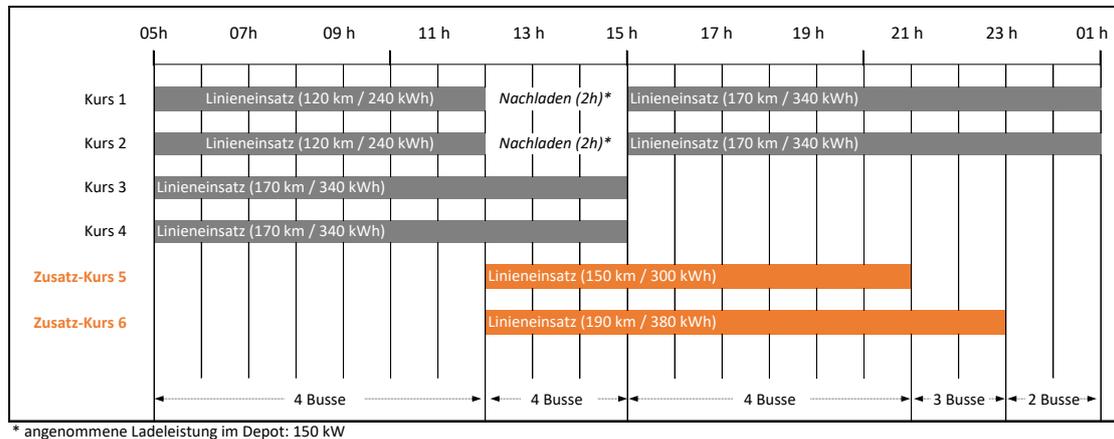
Gelegenheitslader statisch	Depotlader
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 120 kWh-Batterie* ▪ 3 Ladestationen (450 kW): je eine Bhf. Ebikon und Meggen Gottlieben sowie eine an Hast. Brüelstrasse (für Abendbetrieb) ▪ keine zusätzlichen Fahrzeugumläufe erforderlich; die fahrplanmässigen Wendezeiten reichen zum Nachladen der Batterien aus. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 4 t Batterie** ▪ max. Tageseinsätze: ca. 350 ▪ Reichweite pro Ladung: 180 km (Basisszenario) bzw. 220 optimistisches Szenario ▪ Im Zeithorizont 2030 2 zus. Busse, im Zeithorizont 2042 noch ein zus. Bus zum Nachladen erforderlich

* Eine 75 kWh-Batterie würde theoretisch reichen, wenn an beiden Linienenden eine Ladestation vorhanden ist (Reichweite 22 km, Linienlänge 16 km). Die Reichweite einer Batterieladung sollte aber mindestens einen Umlauf ermöglichen für den Fall, dass Ladestation an einem Linienende ausfällt.

** Bei Gelegenheitsladern gehen wir davon aus, dass die Energiekapazität der Batterie über die Zeit konstant bleiben wird. Bei Depotladern hingegen wird die Masse konstant gehalten und damit die Energiekapazität in Zukunft steigen. Deshalb sind die Batteriegrößen nicht mit denselben Eigenschaften angegeben.

Tabelle INFRAS.

Abbildung 17: Fahrzeugeinsatzkonzept für Variante Depotlader für die Linie 60.025/26

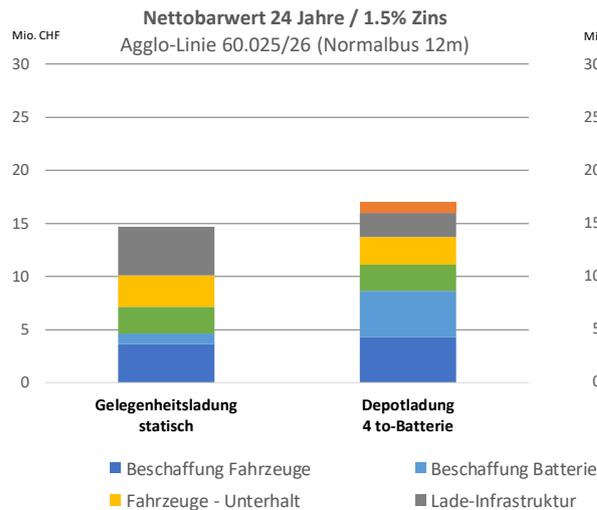


Grafik INFRAS.

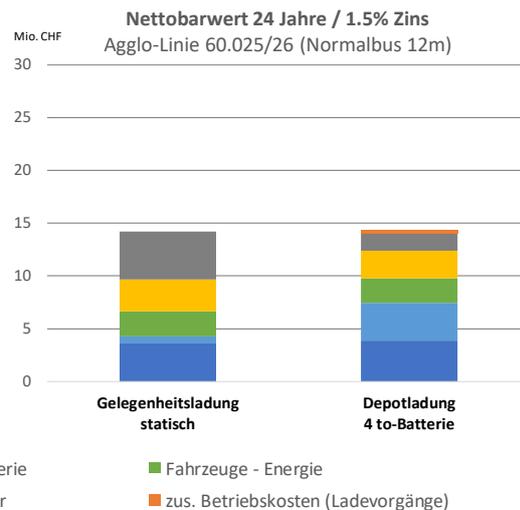
Auswirkungen auf die relevanten Kostenblöcke

Abbildung 18: Teilkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030

Basisszenario



Szenario «Optimistische Annahmen Batterie»



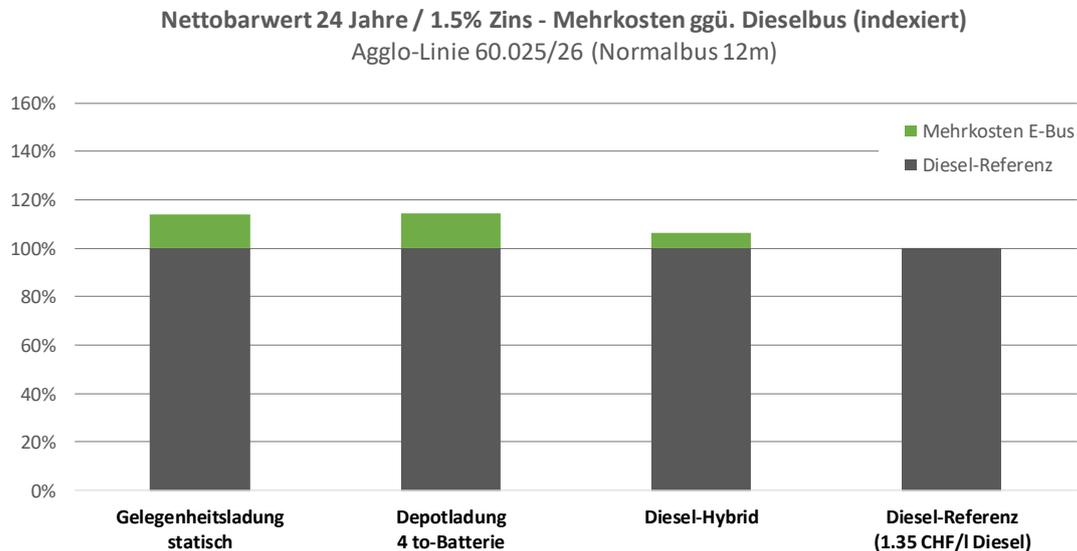
Grafik INFRAS

Erkenntnisse für den Zeithorizont 2030:

- Im Basisszenario schneidet der Gelegenheitslader statisch besser ab als der Depotlader. Der Depotlader löst in diesem Szenario im Zeithorizont 2030 zwei zusätzliche Busse und ab 2042 noch ein zusätzlicher Bus aus, während der Gelegenheitslader keine zusätzlichen Umläufe bzw. Fahrzeuge benötigt.
- Bei optimistischen Annahmen zur Batterieentwicklung (höhere Energiedichte, tiefere Preise) schneiden der Depotlader und der Gelegenheitslader statisch gleich ab, weil aufgrund der grösseren Reichweiten für den Depotlader weniger bzw. keine zusätzliche Busse zum Nachladen resultieren (im Horizont 2030 ein zusätzlicher Bus und im Horizont 2042 kein zusätzlicher Bus).

Mehrkosten gegenüber Diesel

E-Busse auf der Linie 60.025/26 sind bezüglich Linienvollkosten rund 15% teurer gegenüber dem Dieselbus (bei Dieselpreis für konzessionierten Betrieb von 1.35 CHF/l). Bei einem Dieselpreis von 2.50 CHF/l wären Dieselbusse und E-Busse mit Depotladung oder Gelegenheitsladung ungefähr gleich teuer.

Abbildung 19: Vollkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030 (Szenario «Optimistische Annahmen Batterie»)

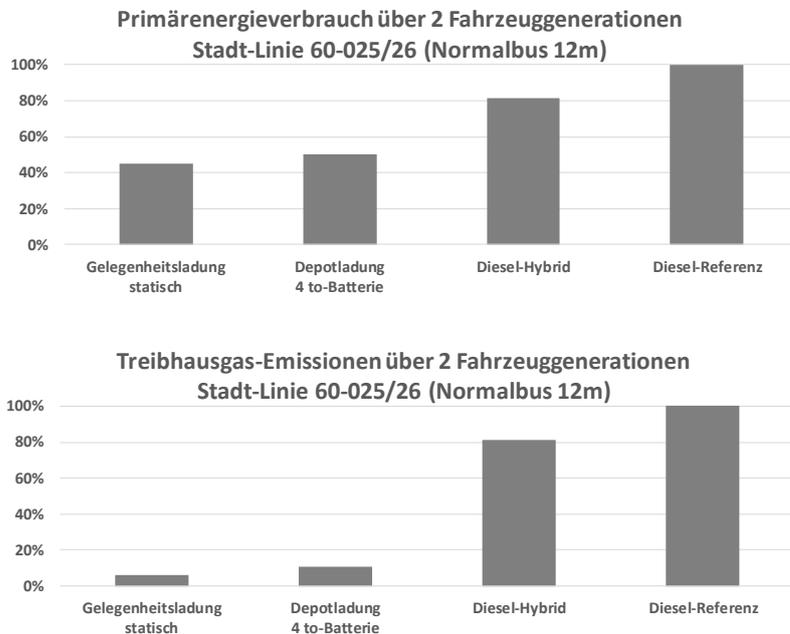
Annahme: die betrachteten Teilkosten (entspricht in der Grafik den Mehrkosten E-Bus = grüner Anteil) machen bei der Diesel-Referenzvariante ca. 40% der Vollkosten (inkl. Varianten unabhängige Kosten für Fahrpersonal, allg. Overhead etc.) aus.

Grafik INFRAS.

Ökologische Auswirkungen

Wie die Abbildung 20 zeigt, lassen sich mit einem E-Buseinsatz auf der Linie 60.025/26 der Primärenergiebedarf um 50 – 55% und die Treibhausgas-Emissionen sogar um 90% gegenüber den heute eingesetzten Dieselnissen reduzieren. Zwischen den zwei E-Bus-Varianten bestehen keine grossen Unterschiede. Tendenziell schneidet der Depotlader aufgrund der grösseren Batterien etwas weniger gut ab verglichen mit den Gelegenheitsladern.

Abbildung 20: Auswirkungen von E-Bussen auf Primärenergiebedarf und Treibhausgas-Emissionen



Grafik INFRAS.

4.1.4. Regionallinie 60.061 (Gelenkbus)

Spezifikation

Tabelle 5: Spezifikation der drei E-Bus-Varianten für die Linie 60.061

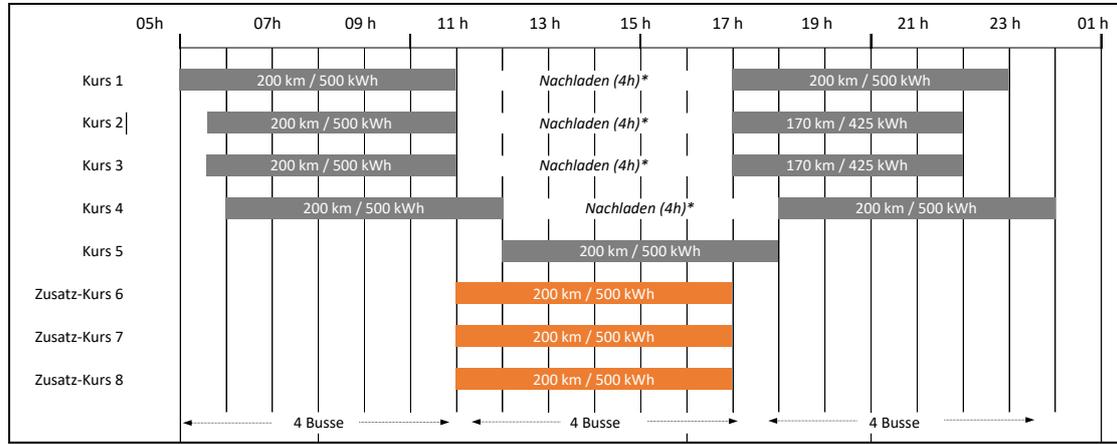
Gelegenheitslader statisch	Kombilader	Depotlader
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 200 kWh-Batterie* ▪ 2 Ladestationen (450 kW): je eine in Ettiswil und Luzern Bahnhof ▪ 2 zusätzliche Umläufe Mo-Sa, ▪ 1 zusätzlicher Umlauf So 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 350 kWh-Batterie (ca. 2 t) ▪ 1 Ladestationen (450 kW): in Ettiswil ▪ 1 zusätzlicher Umlauf Mo-So 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 4 t Batterie** ▪ max. Tageseinsätze: > 400 km ▪ Reichweite pro Ladung: 180 km (Basisszenario) bzw. 220 optimistisches Szenario ▪ Im Zeithorizonte 2030 und 2042 3 zus. Busse zum Nachladen erforderlich

* Diese Batteriegrösse ist notwendig, weil es sich um eine sehr lange Linie handelt (ca. 32 km bzw. 64 km pro Umlauf).

** Bei Gelegenheitsladern gehen wir davon aus, dass die Energiekapazität der Batterie über die Zeit konstant bleiben wird. Bei Depotladern hingegen wird die Masse konstant gehalten und damit die Energiekapazität in Zukunft steigen. Deshalb sind die Batteriegrössen nicht mit denselben Eigenschaften angegeben.

Tabelle INFRAS.

Abbildung 21: Fahrzeugeinsatzkonzept für Variante Depotlader für die Linie 60.061 (ohne Verstärker)



* angenommene Ladeleistung im Depot: 150 kW

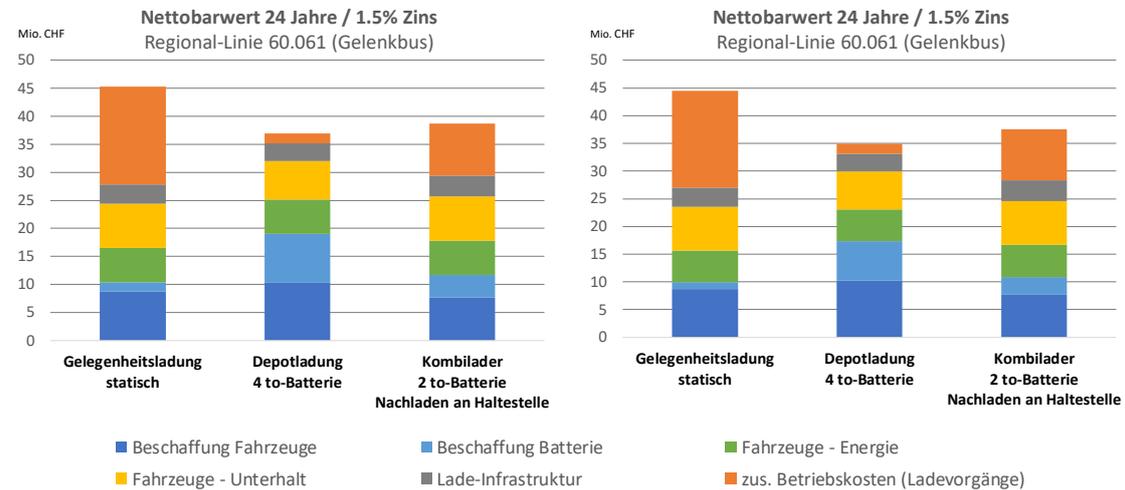
Grafik INFRAS.

Auswirkungen auf die relevanten Kostenblöcke

Abbildung 22: Teilkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030

Basisszenario

Szenario «Optimistische Annahmen Batterie»



Grafik INFRAS

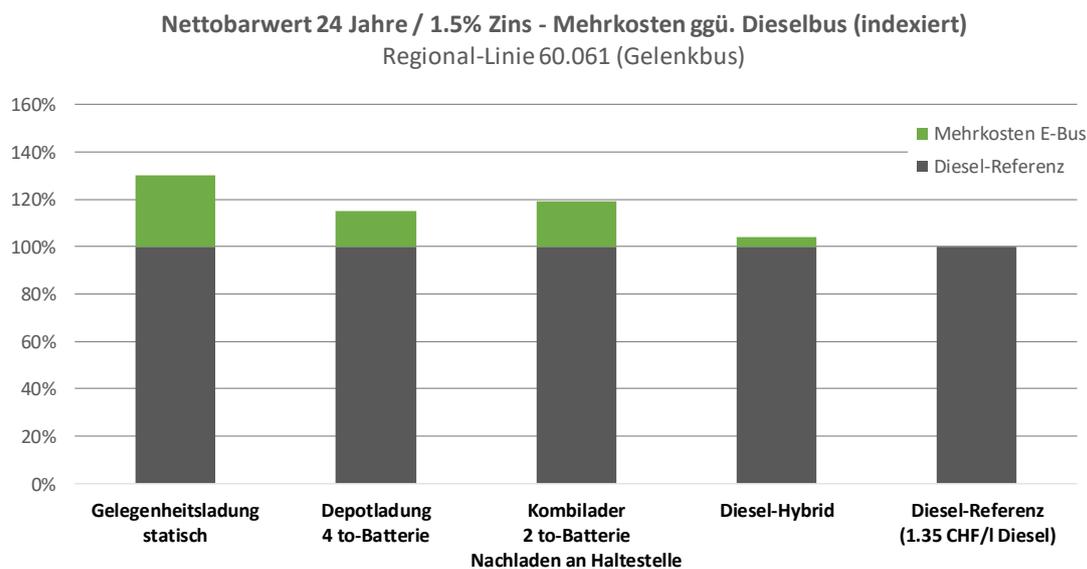
Erkenntnisse für den Zeithorizont 2030:

- In beiden Szenarien schneidet der Depotlader als Bestvariante unter den E-Bus-Optionen ab.
- Der Kombi-Lader bringt keine Vorteile; die Ladestation zusammen mit dem zusätzlich erforderlichen Umlauf ist in der Summe teurer als die drei zusätzlichen Busse beim Depotlader.

Mehrkosten gegenüber Diesel

E-Busse auf der Linie 60.061 sind bezüglich Linienvollkosten rund 15% - 30% teurer gegenüber dem Dieselbus (bei Dieselpreis für konzessionierten Betrieb von 1.35 CHF/l). Bei einem Dieselpreis von 2.50 CHF/l wären Dieselbus und E-Busse mit Depotladung ungefähr gleich teuer.

Abbildung 23: Vollkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030 (Szenario «Optimistische Annahmen Batterie»)



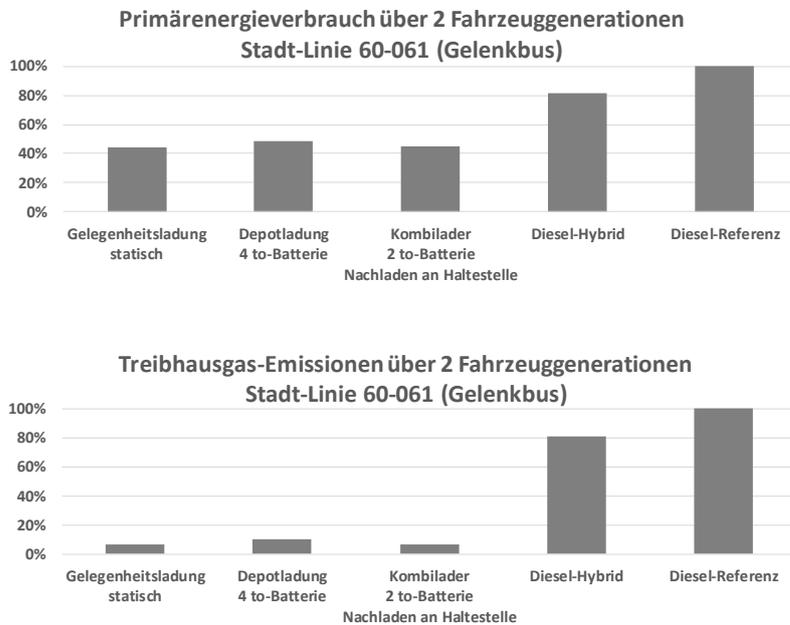
Annahme: die betrachteten Teilkosten (entspricht in der Grafik den Mehrkosten E-Bus = grüner Anteil) machen bei der Diesel-Referenzvariante ca. 40% der Vollkosten (inkl. Varianten unabhängige Kosten für Fahrpersonal, allg. Overhead etc.) aus.

Grafik INFRAS.

Ökologische Auswirkungen

Wie die Abbildung 24 zeigt, lassen sich mit einem E-Buseinsatz auf der Linie 60.061 der Primärenergiebedarf um 50 – 55% und die Treibhausgas-Emissionen sogar um 90% gegenüber den heute eingesetzten Dieselnbussen reduzieren. Zwischen den drei E-Bus-Varianten bestehen keine grossen Unterschiede. Tendenziell schneidet der Depotlader aufgrund der grösseren Batterien etwas weniger gut ab verglichen mit den Gelegenheitsladern.

Abbildung 24: Auswirkungen von E-Bussen auf Primärenergiebedarf und Treibhausgas-Emissionen



Grafik INFRAS.

4.1.5. Regionallinie 60.271 (Normalbus)

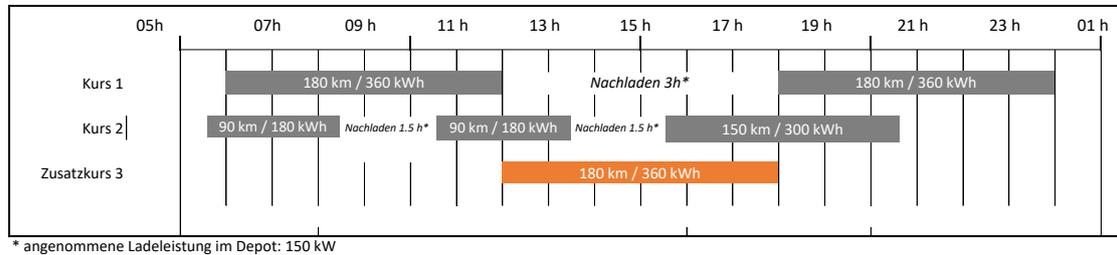
Spezifikation

Tabelle 6: Spezifikation der zwei E-Bus-Varianten für die Linie 60.271

Gelegenheitslader statisch	Depotlader
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 120 kWh-Batterie* ▪ 1 Ladestationen (450 kW): in Willisau Bhf. oder Dagmersellen Bhf. ▪ ein zusätzlicher Fahrzeugumlauf Mo – So erforderlich zum Nachladen der Batterie 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 4 t Batterie** ▪ max. Tageseinsätze: ca. 500 km ▪ Reichweite pro Ladung: 180 km (Basisszenario) bzw. 220 optimistisches Szenario ▪ Im Zeithorizonte 2030 und 2042 ein zus. Bus zum Nachladen erforderlich
<p>* Eine 75 kWh-Batterie reicht nicht für einen Umlauf (Reichweite 22 km, Linienlänge 15 km). Somit wären zwei Ladestationen erforderlich.</p> <p>** Bei Gelegenheitsladern gehen wir davon aus, dass die Energiekapazität der Batterie über die Zeit konstant bleiben wird. Bei Depotladern hingegen wird die Masse konstant gehalten und damit die Energiekapazität in Zukunft steigen. Deshalb sind die Batteriegrößen nicht mit denselben Eigenschaften angegeben.</p>	

Tabelle INFRAS.

Abbildung 25: Fahrzeugeinsatzkonzept für Variante Depotlader für die Linie 60.271



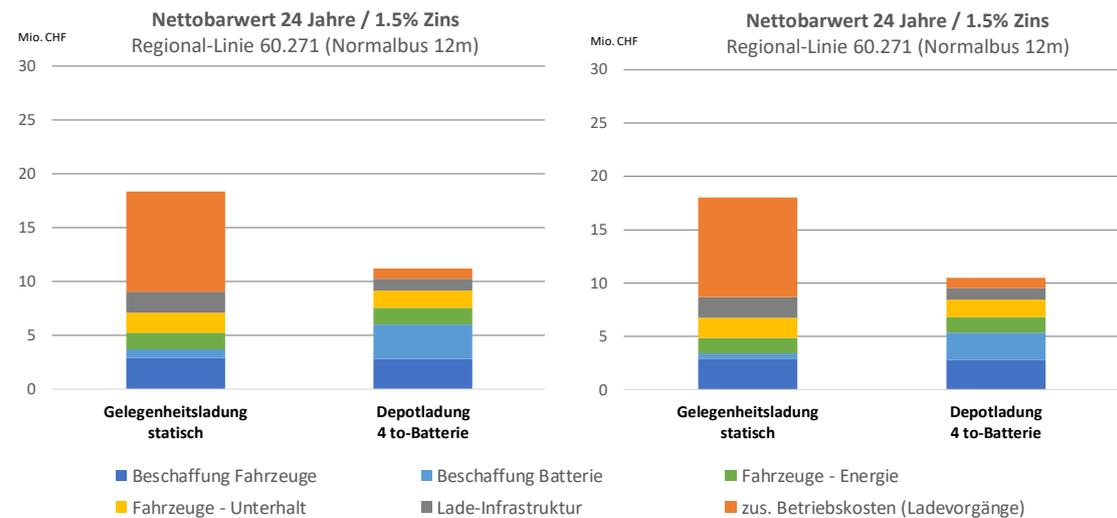
Grafik INFRAS.

Auswirkungen auf die relevanten Kostenblöcke

Abbildung 26: Teilkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030

Basisszenario

Szenario «Optimistische Annahmen Batterie»



Grafik INFRAS

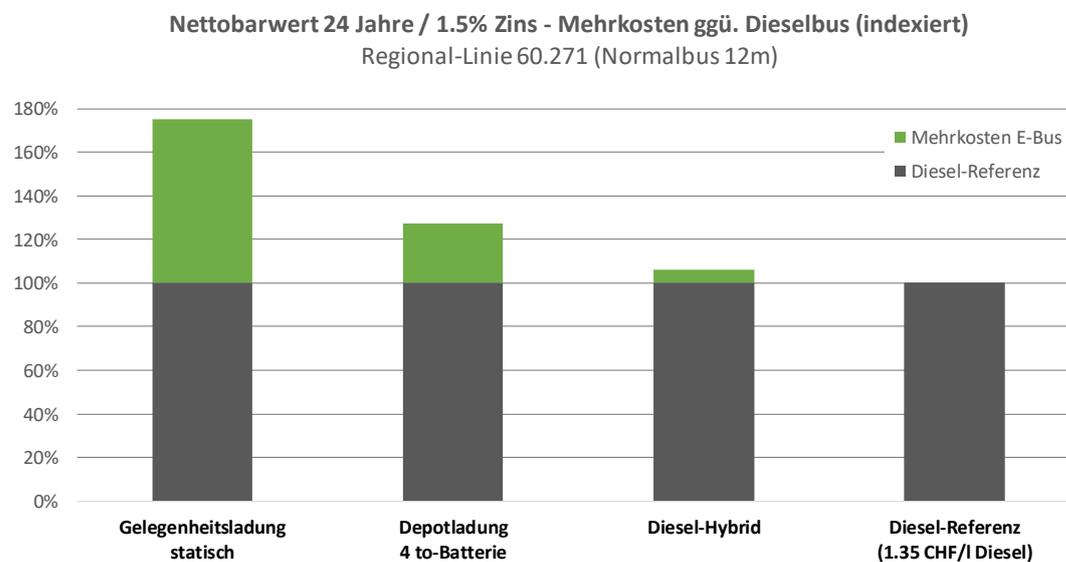
Erkenntnisse für den Zeithorizont 2030:

- In beiden Szenarien schneidet der Depotlader als Bestvariante unter den E-Bus-Optionen ab.
- Die Ladestation zusammen mit dem zusätzlich erforderlichen Umlauf ist in der Summe deutlich teurer als der zusätzliche Bus beim Depotlader.

Mehrkosten gegenüber Diesel

E-Busse auf der Linie 60.271 sind bezüglich Linienvollkosten rund 25% (Depotlader) bzw. 75% (Gelegenheitslader) teurer gegenüber dem Dieselbus (bei Dieselpreis für konzessionierten Betrieb von 1.35 CHF/l). Bei einem Dieselpreis von 3.50 CHF/l wären Dieselbusse und E-Busse mit Depotladung ungefähr gleich teuer.

Abbildung 27: Vollkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030 (Szenario «Optimistische Annahmen Batterie»)



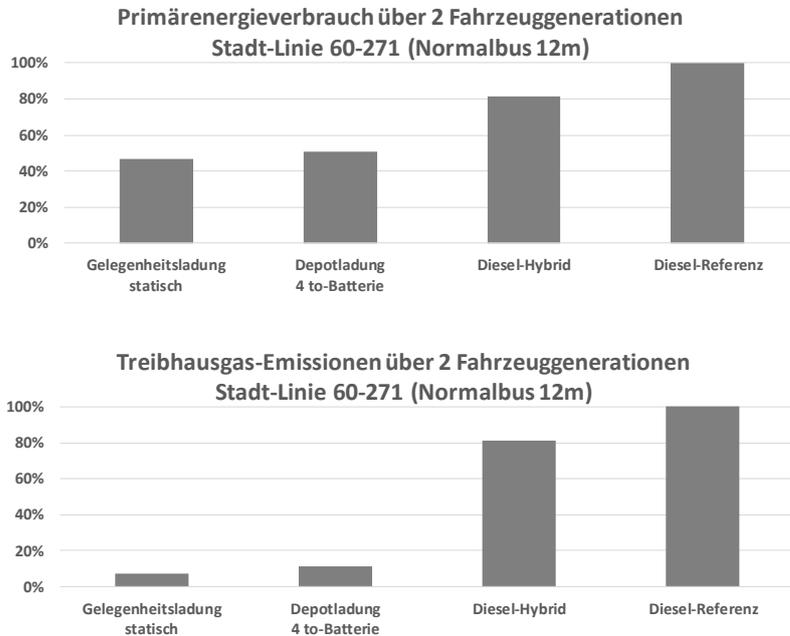
Annahme: die betrachteten Teilkosten (entspricht in der Grafik den Mehrkosten E-Bus = grüner Anteil) machen bei der Diesel-Referenzvariante ca. 40% der Vollkosten (inkl. Varianten unabhängige Kosten für Fahrpersonal, allg. Overhead etc.) aus.

Grafik INFRAS.

Ökologische Auswirkungen

Wie die Abbildung 28 zeigt, lassen sich mit einem E-Buseinsatz auf der Linie 60.271 der Primärenergiebedarf um 50% und die Treibhausgas-Emissionen sogar um 90% gegenüber den heute eingesetzten Dieselbussen reduzieren. Zwischen den zwei E-Bus-Varianten bestehen keine grossen Unterschiede. Tendenziell schneidet der Depotlader aufgrund der grösseren Batterien etwas weniger gut ab verglichen mit den Gelegenheitsladern.

Abbildung 28: Auswirkungen von E-Bussen auf Primärenergiebedarf und Treibhausgas-Emissionen



Grafik INFRAS.

4.1.6. Quartierbuslinie 60.011 (Midibus)

Spezifikation

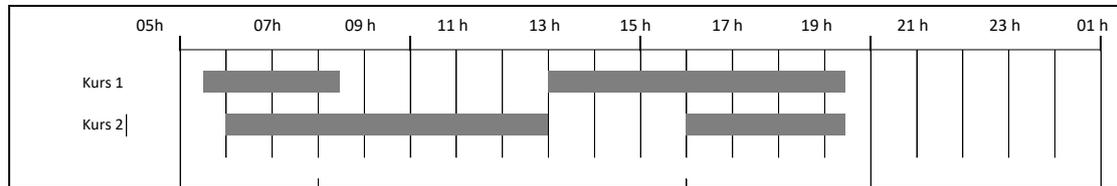
Tabelle 7: Spezifikation der zwei E-Bus-Varianten für die Linie 60.011

Gelegenheitslader statisch	Depotlader
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 75 kWh-Batterie ▪ 1 Ladestationen (450 kW): in Kriens Dattenberg ▪ kein zusätzlicher Fahrzeugumlauf erforderlich zum Nachladen der Batterie 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2.5 t Batterie* ▪ max. Tageseinsätze: ca. 180 km ▪ Reichweite pro Ladung: 160 km (Basisszenario) bzw. 215 optimistisches Szenario ▪ Im Zeithorizonte 2030 zusätzlicher Fahrzeugtausch, jedoch kein zusätzlicher Bus erforderlich

* Bei Gelegenheitsladern gehen wir davon aus, dass die Energiekapazität der Batterie über die Zeit konstant bleiben wird. Bei Depotladern hingegen wird die Masse konstant gehalten und damit die Energiekapazität in Zukunft steigen. Deshalb sind die Batteriegrößen nicht mit denselben Eigenschaften angegeben.

Tabelle INFRAS.

Abbildung 29: Fahrzeugeinsatzkonzept für Variante Depotlader für die Linie 60.011



* angenommene Ladeleistung im Depot: 150 kW

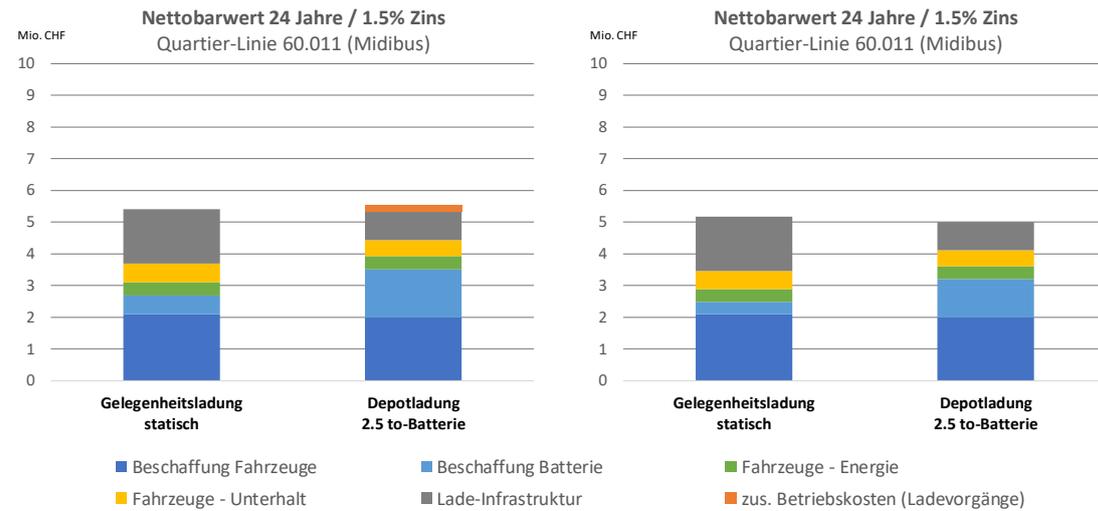
Grafik INFRAS.

Auswirkungen auf die relevanten Kostenblöcke

Abbildung 30: Teilkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030

Basisszenario

Szenario «Optimistische Annahmen Batterie»



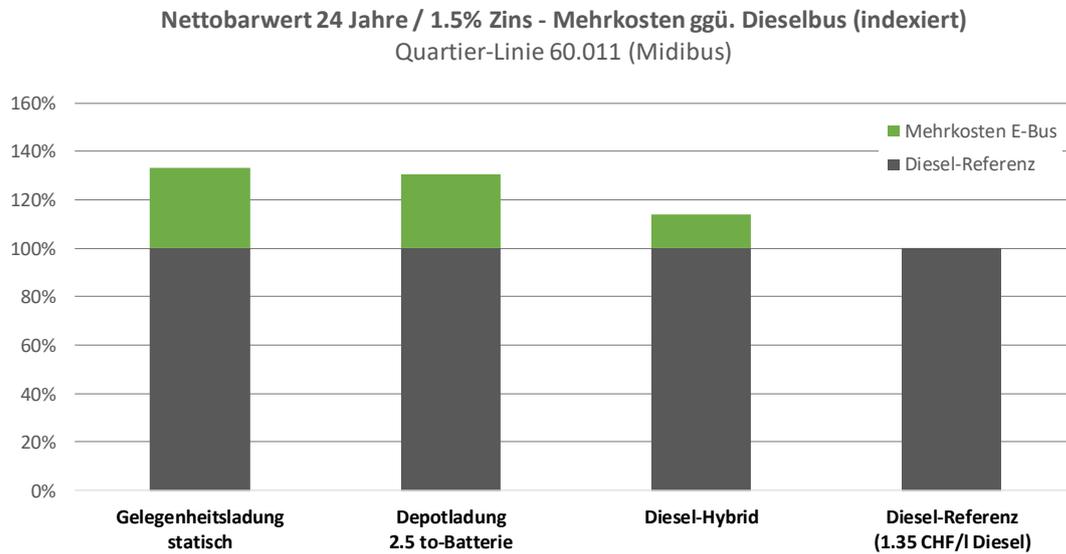
Grafik INFRAS

Erkenntnisse für den Zeithorizont 2030:

- In beiden Szenarien schneiden die beiden Ladekonzepte Depotlader und Gelegenheitslader statisch gleichwertig ab. Bei beiden resultiert auch kein zusätzlicher Fahrzeugbedarf.

Mehrkosten gegenüber Diesel

E-Busse auf der Linie 60.011 sind bezüglich Linienvollkosten rund 30% teurer gegenüber dem Dieselbus (bei Dieselpreis für konzessionierten Betrieb von 1.35 CHF/l). Bei einem Dieselpreis von 5.00 CHF/l wären Dieselbusse und E-Busse mit Depotladung ungefähr gleich teuer.

Abbildung 31: Vollkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030 (Szenario «Optimistische Annahmen Batterie»)

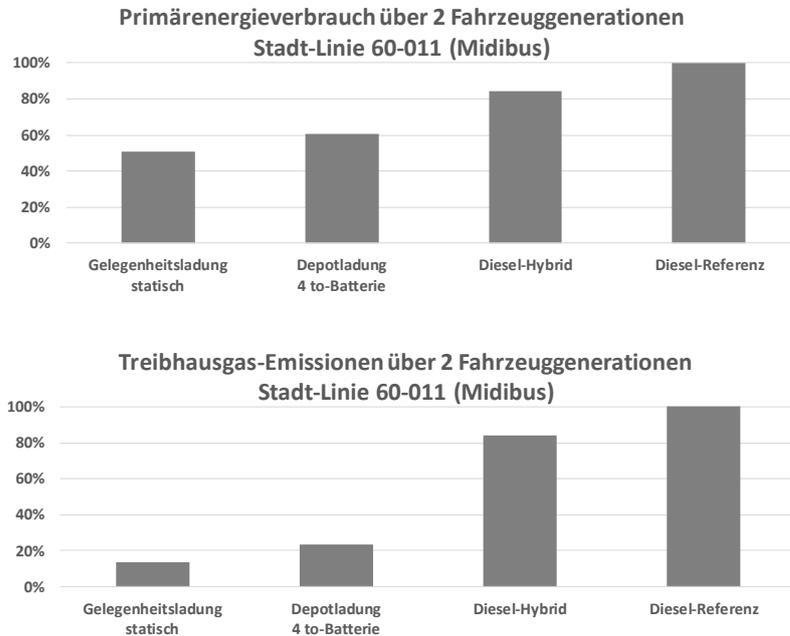
Annahme: die betrachteten Teilkosten (entspricht in der Grafik den Mehrkosten E-Bus = grüner Anteil) machen bei der Diesel-Referenzvariante ca. 40% der Vollkosten (inkl. Varianten unabhängige Kosten für Fahrpersonal, allg. Overhead etc.) aus.

Grafik INFRAS.

Ökologische Auswirkungen

Wie die Abbildung 32 zeigt, lassen sich mit einem E-Buseinsatz auf der Linie 60.011 der Primärenergiebedarf um 40 – 50% und die Treibhausgas-Emissionen sogar um 85 – 90% gegenüber den heute eingesetzten Dieselnissen reduzieren. Zwischen den drei E-Bus-Varianten bestehen keine grossen Unterschiede. Tendenziell schneidet der Depotlader aufgrund der grösseren Batterien etwas weniger gut ab verglichen mit den Gelegenheitsladern.

Abbildung 32: Auswirkungen von E-Bussen auf Primärenergiebedarf und Treibhausgas-Emissionen



Grafik INFRAS.

4.2. Erkenntnisse Zweckmässigkeitsbetrachtung Linien-Cluster

Die Analysen haben gezeigt, dass die Zweckmässigkeit der E-Bus-Optionen in hohem Masse abhängig ist von den spezifischen Gegebenheiten der Linien (u.a. Linienlänge, Linientopologie, Liniensplitting, Länge der Tageseinsätze der Busse, Wendezeiten, Hauptverkehrsverstärkerkurse, vorhandenes Oberleitungsnetz). Die hier gezogenen Folgerungen zu den zweckmässigen Einsatzfeldern im VVL sind denn auch eher genereller Natur. In der Umsetzung ist abhängig von den spezifischen Randbedingungen für jede Linie bzw. jedes Linienbündel die optimalste E-Bus-Variante in einem Detailprojekt zu evaluieren.

4.2.1. Ökonomische Bewertung

Die Erkenntnisse zur Wirtschaftlichkeit unterscheiden sich zwischen den verschiedenen Linien-Clustern:

Stadt-Linien:

- Das IMC-Konzept ist zweckmässig, wenn ein bereits vorhandenes Oberleitungsnetz mitbenutzt werden kann und somit nur wenig zusätzliche Oberleitungsinfrastruktur erstellt werden

muss. Als Richtgrösse lässt sich aus den Analysen ableiten, dass der IMC-Bus gegenüber den anderen beiden Ladekonzepten wirtschaftlich günstiger ist, wenn mindestens 50% der erforderlichen Netzlänge zum Nachladen der Batterien⁹ bereits vorhanden ist. Ein geringer Anteil an zusätzlich zu erstellender Oberleitungsinfrastruktur kann sich beispielsweise auch durch eine Verknüpfung mit einem bereits elektrifizierten Trolleybus-Linienast ergeben.

- Depotlader oder Gelegenheitslader machen aus wirtschaftlicher Sicht vor allem dann Sinn, wenn keine zusätzlichen Busse zum Nachladen der Batterien nötig sind. Beim Gelegenheitslader und Kombilader muss zudem das Nachladen möglichst mit einer, maximal zwei Ladestationen möglich sein. Linien mit unterschiedlichen Linienendpunkten bzw. Angeboten auf Teilstrecken – wie beispielsweise die untersuchte Linie 60.020 – erfüllen diese Bedingung nicht und ziehen eine vergleichsweise teure Ladeinfrastruktur nach sich. Der Gelegenheitslader statisch ist in diesem Fall nicht zweckmässig.

Agglomerations-Linien:

- Das IMC-Konzept ist in diesem Einsatzfeld i.d.R. sehr teuer, weil nicht auf bereits vorhandene Oberleitungen zurückgegriffen werden kann. Die Folge davon sind hohe Investitionen in ein neues Oberleitungsnetz, welche sich wirtschaftlich nicht rechtfertigen lassen.
- Die Optionen Depotlader oder Gelegenheitslader statisch schneiden hier aus wirtschaftlicher Sicht klar besser ab, insbesondere wenn keine zusätzliche Busse zum Nachladen der Batterien nötig sind.

Regionallinien:

- Bei den Regionallinien steht der Depotlader im Vordergrund.
- Der Gelegenheitslader statisch ist aufgrund der optimierten Umläufe mit zu kurzen Wendezeiten verglichen mit der erforderlichen Nachladezeit nicht geeignet. Der Einsatz von zusätzlichen Bussen führt – v.a. bei im Stundentakt betriebenen Linien – zu unverhältnismässig langen Standzeiten mit entsprechenden Kostenfolgen. Theoretisch könnten ein Teil dieser Standzeiten zwar für Angebotsverdichtungen genutzt werden; solche dürften jedoch i.d.R. aufgrund des fehlenden Nachfragepotenzial kaum opportun sein.
- Wenn entsprechende Voraussetzungen gegeben sind (zeitweise genügend Wendezeit im Fahrplan für teilweises Nachladen, z.B. während der Nebenverkehrszeit), kann auch der Kombilader eine zweckmässige Option darstellen.

⁹ Ca. 40-60% der Linienlänge; der Anteil Oberleitung ist stark abhängig vom Streckenprofil und der resultierenden Länge eines zusammenhängenden fahrleitunglosen Abschnitts sowie der Nachlademöglichkeit im Falle von Umleitungen und Teilstreckenbetrieb.

- Sind sehr lange Tageseinsätze (> 400 bis 500 km) gefordert, welche auch längerfristig nicht mit einem Depotlader ohne Nachladung zu bewältigen sind, stellen die Brennstoffzelle oder Biotreibstoffe (z.B. Biodiesel) eine mögliche Option dar.

Quartierlinien

- Für die Quartier-Linien stellen sowohl der Depotlader als auch der Gelegenheitslader statisch eine zweckmässige Option dar, solange keine zusätzlichen Busse zum Nachladen der Batterien nötig sind.

Die folgende Übersicht zeigt die aus wirtschaftlicher Sicht zweckmässigen Ladekonzepte bzw. E-Bus-Optionen für die verschiedenen Linien-Cluster.

Abbildung 33: Wirtschaftlich zweckmässige E-Bus-Optionen für die verschiedenen Linien-Cluster

Linien-Cluster	E-Bus-Variante			
	Gelegenheitsl. dynamisch IMC	Gelegenheitsl. statisch	Depotlader	Evtl.Weitere Optionen?
Stadtlinie Gelenkbusse	✓ wenn wenig zusätzliche FL nötig	(✓) wenn keine zus. Busse erforderlich	(✓) wenn keine zus. Busse erforderlich	
Agglomerationslinie Gelenkbusse	✗ zu teuer wegen FL Investition	(✓) wenn keine zus. Busse erforderlich	✓ bei optimistischen Annahmen Batterie	
Agglomerationslinie Normalbusse	✗	✓ wenn keine zus. Busse erforderlich	✓ bei optimistischen Annahmen Batterie	
Regionallinie Gelenkbusse	✗	✗ zu teuer: Ladestat. und zus. Umläufen	✓	Brennstoffzelle oder Biotreibstoff? (Tageseinsätze über 400 - 500 km)
Regionallinie Normalbusse	✗	✗ zu teuer: Ladestat. und zus. Umläufen	✓	Brennstoffzelle oder Biotreibstoff? (Tageseinsätze über 400 - 500 km)
Quartierlinie Midibusse	✗	✓ Keine signifikante Kostendiff.	✓ 2.5 to Batterie	

Grafik INFRAS.

4.2.2. Ökologische Bewertung

Die Erkenntnisse zur Ökologie unterscheiden sich im Gegensatz zur Wirtschaftlichkeit nicht zwischen den verschiedenen Linien-Clustern.

- Emissionen und Energieverbrauch: E-Busse unterscheiden sich bzgl. Energieverbrauch, THG- und NO_x-Emissionen nicht wesentlich. Alle drei führen zu spürbaren Verbesserungen gegenüber dem heutigen Dieselbusbetrieb. Der Depotlader ist bzgl. THG-Emissionen und Energieverbrauch etwas weniger gut wegen den grösseren Batterien, die v.a. in der Herstellung höhere Umweltbelastungen verursachen.
- Partikel (PM): Die durch Reifenabrieb, Staubaufwirbelung und Bremsen entstehenden Partikelemissionen sind variantenneutral. Bei der Variante IMC (Trolleybus) wirkt sich der Abrieb an der Oberleitung leicht negativ aus.
- Lärm: Alle drei E-Busvarianten haben deutliche Vorteile gegenüber dem Dieselbus, v.a. beim Anfahren und in Steigungen sowie bei niedrigen Geschwindigkeiten im Quartier. Ab ca. 40 - 50 km/h dominieren das Fahr- und Rollgeräusch des Busses. Dann gibt es bezüglich Lärmemissionen kein wesentlicher Unterschied mehr zwischen E-Bus und Diesel.

4.2.3. Weitere Kriterien

Betriebliche und angebotsplanerische Aspekte

- Flexibilität Fahrzeug-Gesamtflotte: Vorteile für den Depotlader (z.B. Bahnersatz, Ersatzbetrieb bei Baustellen, Extrafahrten, Shuttle-Angebote bei Anlässen).
- Interventionen bei Betriebsstörungen (z.B. Verspätungen, Streckenblockierungen): Depotlader haben Vorteile, da vorzeitiges Wenden flexibler möglich ist. Beim Gelegenheitslader statisch wären Zwischenladestationen erforderlich mit entsprechenden Kostenfolgen; beim IMC wäre das Oberleitungsnetz anordnung dahingehend zu konzipieren, was u.U. einen höheren Anteil Oberleitung bedeuten kann.
- Depotlader können sich nachteilig auf die Personaleinsatzkonzepte auswirken, da mehr Kurzdienste bzw. «gestückelte» Dienste anfallen.
- Leistungsbedarf beim Laden: Hohe Leistung bei Gelegenheitsladung an Haltestellen erforderlich; sehr hoher Leistungsbedarf bei grosser Depotladerflotte in den Busgaragen.
- Laden am Bhf. Luzern für Gelegenheitslader: Realisierung von Ladestationen bezüglich Platzbedarfes und Städtebau schwierig. Das bedeutet, dass Radiallinien am Bahnhof Luzern kaum mehr machbar sind.
- Auch für Durchmesserlinien ist der Gelegenheitslader statisch wenig geeignet, weil Zwischenladungen zu längeren Aufenthaltszeiten im Zentrum führen, was aus Kundensicht nicht attraktiv ist.

Stadtraum

- Oberleitungen und Ladestationen können den Stadtraum in heiklen Gebieten beeinträchtigen; zudem besteht allenfalls eine Lärm-Problematik bei Ladestationen im Quartier (im Boden versenkbar, mit entsprechenden Kostenfolgen).

Kundennutzen

- Die drei E-Busvarianten sind gleichwertig.
- Gegenüber Diesel haben E-Busse ruhigere, komfortable Fahrweise und weniger Innenlärm.

4.3. Fazit

E-Busse im Vergleich zum heutigen Dieselbus

Im Horizont 2030 werden die Vollkosten von Elektrobuslinien aufgrund der teureren Fahrzeuge und Ladeinfrastrukturen je nach Einsatzfeld 15% bis 25% höher sein als von Dieselbuslinien. Der Dieselpreis müsste stark ansteigen (Treibstoffpreis für konzessionierten Betrieb >2.50 CHF/Liter), damit die Elektrobusse aus betriebswirtschaftlicher Sicht besser abschneiden als Dieselbusse. Das ist nur realistisch, wenn Diesel mit einer substantiellen Lenkungsabgabe verteuert und die Rückerstattung der Mineralölsteuer aufgehoben wird.

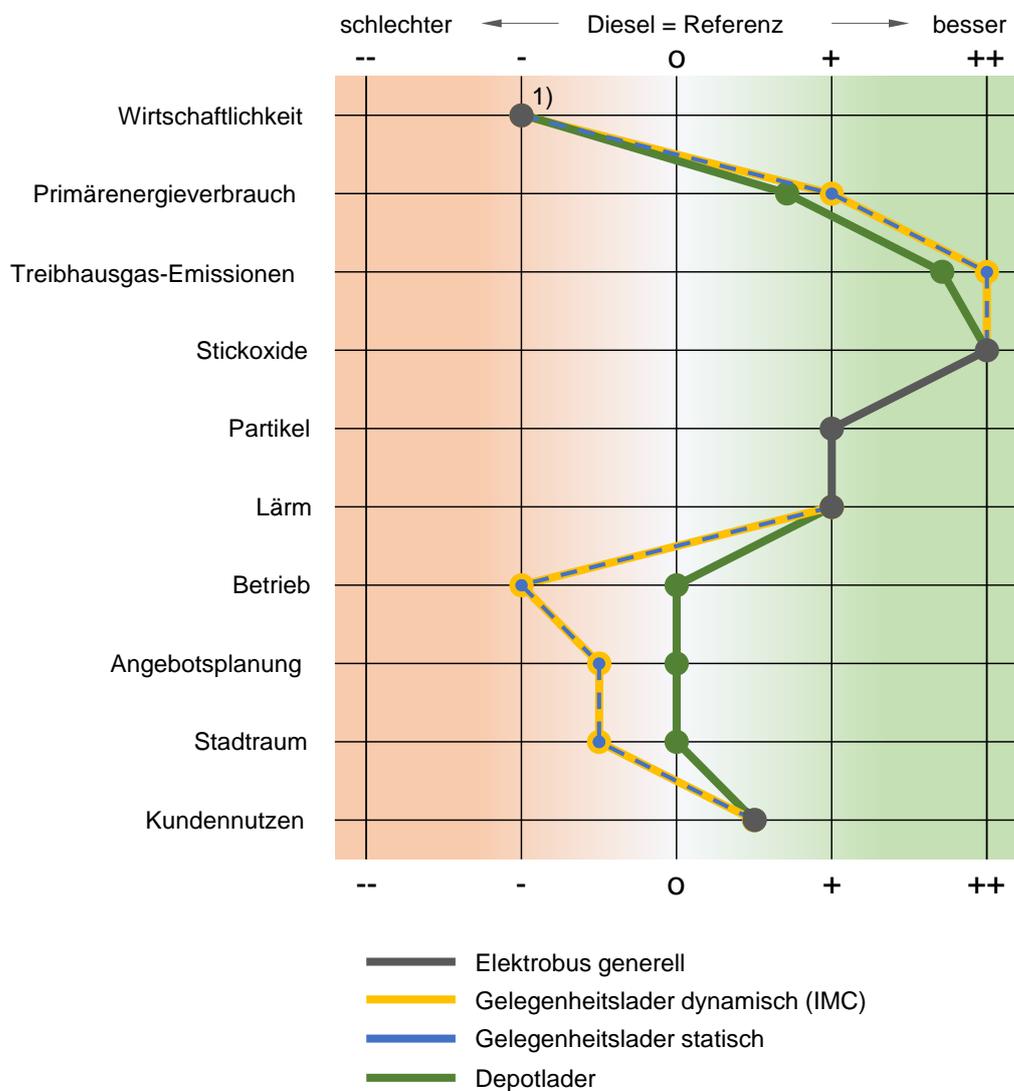
Mit Elektrobusen lassen sich jedoch deutliche Umweltvorteile gegenüber den Dieselbussen erzielen. Einerseits reduziert der Elektroantrieb den durchschnittlichen Primärenergieverbrauch um 50% bis 60% (inkl. elektrisch betriebener Klimaanlage und Heizung). Andererseits verkehren die Busse praktisch frei von Treibhausgasemissionen, sofern der dazu bezogene Strom aus erneuerbarer Energie stammt. Vorteilhaft schneidet der Elektrobus auch bei den Stickoxid- und Partikelemissionen so wie beim Lärm ab.

Bei den Auswirkungen im Betrieb und für die Angebotsplanung ist zu unterscheiden, um welchen Typ Elektrobus es sich handelt. Der Depotlader ist diesbezüglich gleich bewertet wie der Dieselbus. Die Gelegenheitslader erweisen sich bei diesen Kriterien als nachteilig. Im Betrieb schränkt die Gebundenheit an die Ladeinfrastruktur entlang der Linie die Einsatzflexibilität des Fahrzeugs bzw. der Flotte ein. Insbesondere ermöglichen die Gelegenheitslader keine Bahnersatzangebote, Ersatzbetriebe bei Betriebsstörungen oder Baustellen, Extrafahrten bei Anlässen etc. Bei der Angebotsgestaltung resultieren vor allem für den Gelegenheitslader statische Restriktionen, die die Flexibilität einschränken. Beispielsweise bedeuten Linienverlängerungen i.d.R. auch die Verlegung der Ladestationen oder bei Liniensplitting am Linienende oder Verdichtungsangeboten während der Hauptverkehrszeiten zusätzliche Ladestationen. Auch Durchmesserlinien lassen sich mit dem Ladekonzept mit Ladestationen entlang der Linien weni-

ger flexibel umsetzen. Entweder sind Fahrzeuge mit grösseren Batterien erforderlich mit entsprechend zunehmenden Ladezeiten an den Linienenden. Oder im Zentrum sind zusätzliche Ladestationen und Ladevorgänge erforderlich, was lange Zwischenhalte zur Folge hat und somit die Attraktivität einer Durchmesserlinie in Frage stellt.

Bei den Auswirkungen auf den Stadtraum sind die Gelegenheitslader aufgrund der wahrnehmbaren Ladeinfrastruktur entlang der Linien leicht negativ bewertet im Vergleich zum Depotlader bzw. Dieselbus.

Abbildung 34: Übersicht Bewertung von Elektrobussen gegenüber Dieselbussen



- 1) Gelegenheitslader dynamisch: wenig zusätzliche Oberleitung
 Gelegenheitslader statisch: keine zus. Fahrzeuge, wenig Ladestationen
 Depotlader: keine zus. Fahrzeuge

Grafik INFRAS.

Welche E-Busoption für welches Einsatzfeld?

Der Depotlader bietet sich für alle Linien-Cluster als Option an, sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus betrieblichen Überlegungen. Voraussetzung ist jedoch, dass das Nachladen der Batterien kein zusätzlicher Fahrzeugbedarf auslöst. Mittelfristig eignet sich der Depotlader mit noch beschränkten Reichweiten vor allem für Linien mit Hauptverkehrszeiten-Verstärkungskursen. Die nur in den Hauptverkehrszeiten eingesetzten Fahrzeuge ermöglichen ein Nachladen auch untertags, ohne dass die Fahrzeugflotte vergrössert werden muss. Längerfristig wird der Einsatz von Depotladern auch auf Linien mit Tageseinsätzen von 350 bis 400 km möglich sein.

Für Gelenkbuslinien im städtischen Gebiet stellt das IMC-Konzept ebenfalls eine zweckmässige Alternative dar, sofern ein bereits bestehendes Oberleitungsnetz mitbenutzt werden kann. In diesem Fall halten sich die Investitionen in neue Oberleitungen in Grenzen. Die Kosten sind in diesem Fall vergleichbar mit dem Depotlader.

Für Stadt- und Agglomerationslinien bietet sich grundsätzlich auch der Gelegenheitslader mit statischem Ladekonzept bzw. Ladestationen auf der Linie an. Dieses Konzept ist jedoch auch bei günstigen Bedingungen (nur zwei Ladestationen) nicht massgeblich kostengünstiger als der Depotlader. Der Gelegenheitslader statisch ist jedoch gegenüber dem Depotlader deutlich weniger flexibel im Betrieb. Ähnliches gilt auch für die Angebotsgestaltung. Zwar laufen momentan in der Schweiz verschiedene Versuche mit Gelegenheitsladern statisch bzw. sind geplant (z. Bsp. Linie 17 in Bern). Die Absichten dahinter sind jedoch in der Regel, dass die Transportunternehmen möglichst rasch Erfahrungen mit E-Bus-Einsätzen im Linienbetrieb (nicht nur mit einzelnen Fahrzeugen) machen wollen. Mit dem Depotlader ist dies heute aufgrund noch ungenügender Reichweiten nicht möglich. In Bern handelt es sich aber auch nicht um einen Versuch mit einem klassischen Gelegenheitslader statisch (Batterie <100 kWh), sondern um ein Art Kombilader mit grösserer Batterie. Denn die Wendezeiten während der Hauptverkehrszeiten auf der entsprechenden Testlinie sind zu kurz um nach jedem Umlauf nachzuladen. Nachgeladen wird die Batterie v.a. in den Nebenverkehrszeiten, in welchen aufgrund der Taktausdünnung längere Wendezeiten zur Verfügung stehen. Dieses Beispiel zeigt denn auch die starke Abhängigkeit zwischen dem Ladekonzept und dem konkreten Fahrplanangebot.

Die Zweckmässigkeit der E-Bus-Optionen ist in hohem Masse abhängig von den spezifischen Gegebenheiten der Linien. Deshalb ist in der Umsetzung für jede Linie bzw. jedes Linienbündel die optimalste E-Bus-Variante in einem Detailprojekt zu evaluieren. Dabei sind jeweils die spezifischen Randbedingungen vor Ort zu berücksichtigen.

Extrapolation auf den ganzen Kanton

Die folgenden Grafiken zeigen die Einsatzmöglichkeiten der Depotlader in verschiedenen Zeithorizonten (Abbildung 35 und Abbildung 36). Berücksichtigt sind eine zunehmende Reichweite

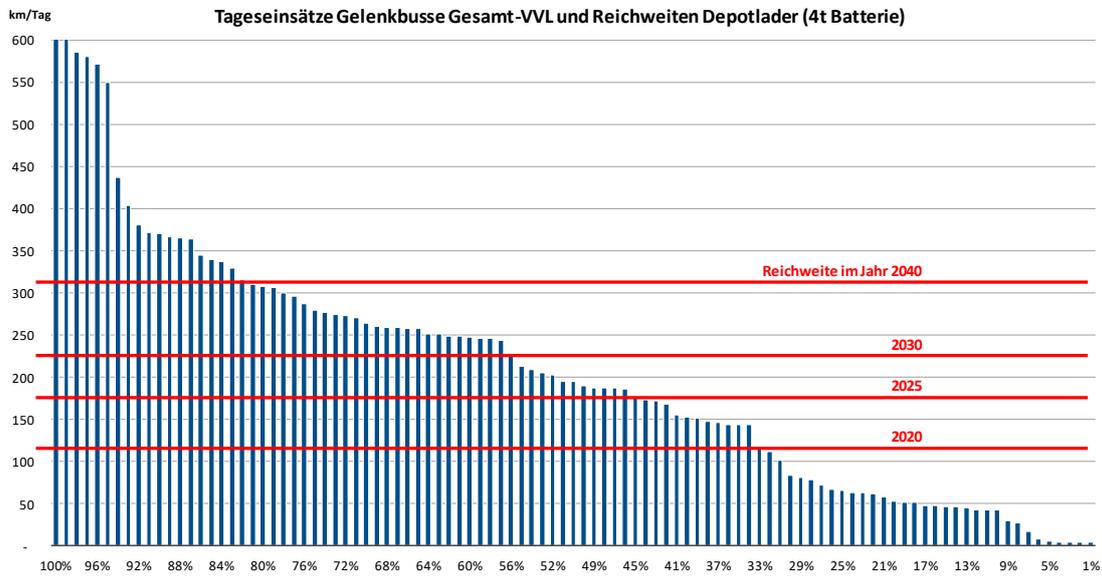
infolge zunehmender Energiedichten der Batterien bei gleichzeitiger Abnahme des spezifischen Energieverbrauchs der Busse (u.a. wegen energieeffizienteren Nebenaggregaten, namentlich HLK). Daraus lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Im Horizont 2025 lassen sich gut 40% aller Gelenkbusfahrzeugeinsätze im VVL mit Depotlader-Bussen abdecken; bei den Normalbussen sind es rund 75%.
- Im Horizont 2040 lassen sich ca. 80% aller Gelenkbusfahrzeugeinsätze im VVL mit Depotlader-Bussen abdecken; bei den Normalbussen rund 95%.

Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass es nicht zweckmässig ist, in einer Übergangsphase Depotlader-Busse aufgrund von noch ungenügenden Reichweiten nur auf Kurzeinsätzen verkehren zu lassen. Dies führt dazu, dass die teureren, umweltfreundlicheren Busse vergleichsweise geringe Laufleistungen innerhalb der Gesamtflotte aufweisen. Dies bedeutet, dass die ökologischen Vorteile nicht proportional zur Anzahl eingesetzter E-Busse ausfallen, weil die Dieselmotoren dadurch überproportionale Kilometerleistungen übernehmen. Kurze Umläufe mit ausgewählten E-Bussen hätte auch Nachteile für die Dienst- und Fahrzeugeinteilung.

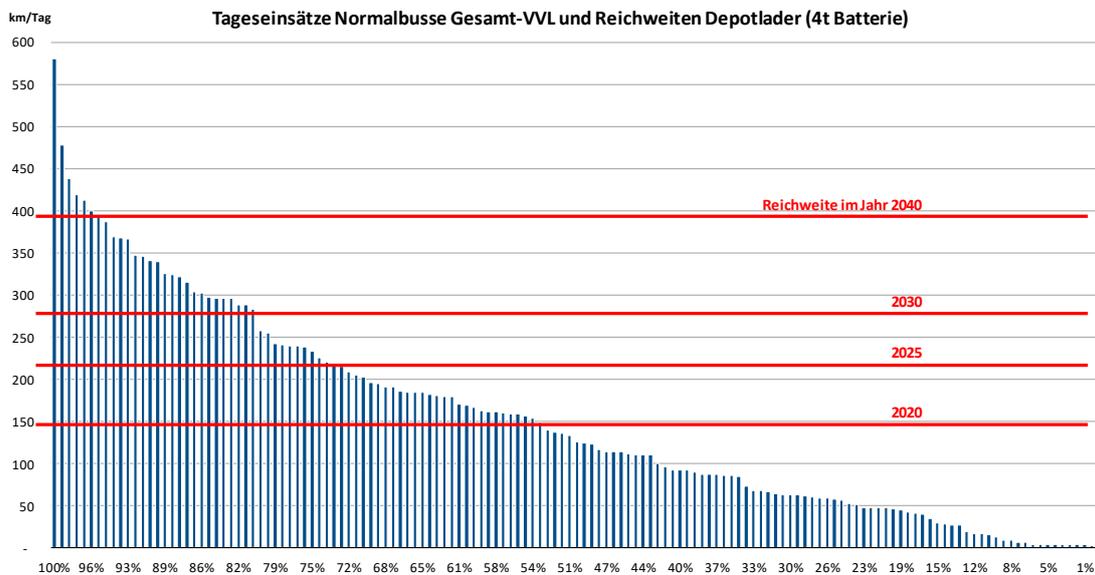
Die in den folgenden Abbildungen angegebenen Reichweiten für die verschiedenen Zeithorizonte basieren einerseits auf Annahmen zur Entwicklung der spezifischen Speicherkapazität der Batterien (optimistisches Szenario). Andererseits wird angenommen, dass für den eigentlichen Fahrbetrieb inkl. Heizung/Lüftung/Klima maximal 60% der theoretischen Batteriekapazität zur Verfügung steht (vgl. dazu auch Ausführungen im Kapitel 3.1.1).

Abbildung 35: Einsatzmöglichkeiten von Depotlader-Gelenkbussen im VVL in verschiedenen Zeithorizonten



Die Angegebenen Reichweiten beziehen sich bezüglich Entwicklung der spezifischen Speicherkapazität der Batterien auf das optimistische Szenario (vgl. Kapitel 3.1.1); hinsichtlich nutzbare Energie aus der Batterie ist ein Wert von 60% der theoretischen Speicherkapazität unterstellt; der angenommene Energieverbrauch von 2.50 kWh/km für einen 18m-Gelenkbus berücksichtigt den Betrieb der HLK-Aggregate über die Batterie.

Abbildung 36: Einsatzmöglichkeiten von Depotlader-Normalbussen im VVL in verschiedenen Zeithorizonten



Die Angegebenen Reichweiten beziehen sich bezüglich Entwicklung der spezifischen Speicherkapazität der Batterien auf das optimistische Szenario (vgl. Kapitel 3.1.1); hinsichtlich nutzbare Energie aus der Batterie ist ein Wert von 60% der theoretischen Speicherkapazität unterstellt; der angenommene Energieverbrauch von 2.0 kWh/km für einen 12m-Standardbus berücksichtigt den Betrieb der HLK-Aggregate über die Batterie.

5. Strategie

Dem vorliegenden Projekt liegt eine Vision (Um 2040 sollen im Kanton Luzern nur noch mit erneuerbarer Energie betriebene, energieeffiziente und emissionsarme Busse fahren) anstelle eines konkreten Ziels zugrunde. Entsprechend fokussiert diese Strategie nicht auf einen detaillierten Umsetzungspfad, sondern diskutiert Fahrzeug- und Einsatzoptionen, mit denen die Vision am ehesten erreicht werden könnte. Dabei fokussieren wir auf monetäre, technische und betriebliche Aspekte. Ökologische Aspekte sind bereits durch die Vision abgedeckt und darum nicht im Fokus der Strategie.

Bei der konkreten Betrachtung von Linienumstellungen ist jeweils zwingend das Ladekonzept (Ladetyp, Ladestandorte bzw. -strecken) detailliert zu prüfen, um der Komplexität gerecht zu werden.

5.1. Langfristige Strategie zur Umsetzung der Vision

Städtisches Netz (inkl. Quartierbuslinien)

Das städtische Busliniennetz soll langfristig aus einer Mischflotte mit dynamischen Gelegenheitsladern (IMC) und Depotladern bestehen:

- Bei anstehendem Fahrzeuersatz IMC-fähige Trolleybusse beschaffen; bei anstehenden Erneuerungsinvestitionen in das Oberleitungsnetz ist jeweils mit Blick auf das IMC-Ladekonzept die dafür erforderliche Oberleitungsinfrastruktur zu überprüfen.
- Umstellung von Dieselbuslinien auf IMC, wo dies aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist:
 - Gelenkbus-Einsatz;
 - mitbenutzen von bestehendem Oberleitungsnetz bzw. minimale zusätzliche Oberleitungsinvestitionen (Richtwert: IMC ist gegenüber Depotlader wirtschaftlich interessant, wenn maximal 50% des erforderlichen Fahrleitungsnetzes¹⁰ zum Nachladen der Batterien neu erstellt werden muss);
- Restliche Linien mit Depotlader:
 - Gelenkbuslinien, für welche IMC nicht zweckmässig (u.a. Linien mit einem hohen Anteil an HVZ-Verstärker bzw. hohem, neu zu erstellenden Oberleitungsnetz);
 - alle Normalbus- und Midibuslinien.

¹⁰ Erforderliche Fahrleitungsnetzlänge einer Linie liegt bei 40-60%.

Mit dieser Strategie bleibt das Trolleybus System vom Grundsatz her erhalten. Es wird jedoch aufgrund des technologischen Fortschritts bei den Batterien flexibilisiert, in dem die heutigen Trolleybusse durch Batteriebusse ersetzt werden und die Oberleitung als Ladeinfrastruktur dient. Der Trolleybus wandelt sich somit zu einem sog. Batterie-Trolleybus, welcher je nach Batteriegrösse auch längere Strecken ohne Oberleitung befahren kann. Das IMC-Ladesystem bietet damit die Chancen, das Trolleybussystem in der Agglomeration Luzern kostengünstig weiter zu entwickeln, indem beispielsweise ein Dieselbus-Linienast mit einem bereits elektrifizierten Linienast verknüpft wird. Des Weiteren bietet das IMC-System Flexibilität für Verlängerungen oder Linienführungsanpassungen bestehender Trolleybuslinien ohne grosse infrastrukturseitigen Kostenfolgen.

Depotlader stellen vor allem auch im Zusammenhang einer Gesamtflottenpolitik eine sinnvolle Option dar, weil sie nicht abhängig von einer entlang der Linie installierten Ladeinfrastruktur sind. Somit können sie – bei genügend Reichweite – wie Dieselbusse sehr flexibel eingesetzt werden, beispielsweise bei Liniennetzveränderungen, für Ersatzbetriebe bei Baustellen oder Betriebsstörungen, für Bahnersatzangebote, für Einsätze an Sonderanlässen.

Agglomerations- und Regionallinien

Die Agglomerations- und Regionallinien sind auf Depotlader-Busse umzustellen:

- Gelenkbus-Linien mit Tageseinsätze bis ca. 350 – 400 km;
- Normalbuslinien mit Tageseinsätzen bis ca. 400 - 450 km;
- allenfalls Kombilader-Konzepte prüfen, um die Reichweiten zu erhöhen bzw. die Batteriegrösse zu reduzieren.
- Für Linien, welche Reichweiten über 400 – 450 km erfordern, sind Plug-in-Hybridbusse (Batteriebus mit Range Extender), Brennstoffzellenbusse oder allenfalls mit Biotreibstoffen betriebene Busse zu prüfen.

5.2. Entwicklungspfad

Zur Erreichung der oben formulierten Langfriststrategie soll unter Berücksichtigung des technologischen Fortschritts folgender Umsetzungspfad verfolgt werden:

Zeithorizont 2020 - 2025

- Städtisches Netz:
 - **Erweiterung des Trolleybusnetzes durch IMC**, wo aus wirtschaftlicher Sicht auch längerfristig gegenüber dem Depotlader vorteilhaft (geringer Anteil an neu zu erstellender Oberleitung, keine HVZ-Verstärker); als mögliche Linie bietet sich die geplante Linie 3

(Verknüpfung der Dieselbuslinie 12 und des bereits elektrifizierten Asts der Trolleybuslinie 8 nach Würzenbach) an; die Linie 3 soll als erstes Folgeprojekt der E-Bus-Strategie gemäss Agglomerationsprogramm Luzern 3. Generation umgesetzt werden.

- **Depotlader**, wo auch längerfristig IMC keine zweckmässige Alternative darstellt, **als Pilot** für Linien, auf welchen die noch vergleichsweise geringen Reichweiten nicht zu zusätzlichem Fahrzeugbedarf führen; mögliche Linien könnten – abhängig vom jeweiligen Angebotskonzept – die Gelenkbuslinien 20 und 22, die Normalbuslinie 14 sowie die Quartierbuslinien sein. Kurzfristig wären auch Pilotversuche mit **Kombiladern** (mit beispielsweise mobilen Ladestationen an den Endhaltestellen) denkbar.
- Agglomerations- und Regionallinien:
 - **Pilot** mit Depotladern für Linien, für welche in diesem Zeithorizont möglichen Reichweiten einen zweckmässigen Einsatz ohne zusätzlichen Fahrzeugbedarf erlauben.
- Um kurzfristig bereits Umweltvorteile erzielen zu können, sind auch Plug-in-Hybrid-Busse (Vorinvestitionen im Depot für späteren Depotlader) oder Biodiesel-Busse¹¹ zu prüfen. Biodiesel ist dann zu empfehlen, wenn kurz- / mittelfristig eine starke Reduktion der Treibhausgasemissionen erreicht werden soll, und die Elektrifizierung aus technischen Gründen (Reichweiten) und/oder wirtschaftlichen Überlegungen (noch) keine Option darstellt.

Ab 2025/2030

- weitere Umstellungen auf IMC;
- Depotlader für Regelbetrieb auf dafür geeigneten Linien bzw. bei vertretbaren Mehrkosten gegenüber Dieselbetrieb.

5.3. Anforderungen an die Stromversorgung

Die E-Bus-Strategie stellt auch zusätzliche Anforderungen an die Stromversorgung. Vor allem das Depotlade-Konzept mit Nachladen der Batterien über Nacht bedingt höhere Stromanschlussleistungen in den Busgaragen, als dies heute der Fall ist. Damit beispielsweise 30 Busse mit einer Ladeleistung von 150 kW gleichzeitig geladen werden können, ist eine Anschlussleistung von 5 MW erforderlich. Laut Aussagen der Stromnetzbetreiber ist an den typischen Standorten von Busdepots sowohl in der Stadt als auch in der Region in der Regel eine Anschlussleistung von 5 MW im Allgemeinen möglich. Bei einer grösseren Depotlader-Flotte ist ergänzend

¹¹ Biogas ist im VVL keine Option, weil heute kein Betreiber Gasbusse hat. Biogasbusse wären höchstens eine Übergangslösung und würden später durch E-Busse ersetzt werden. Der zwischenzeitliche Aufbau der entsprechenden Betankungsinfrastruktur sowie des Werkstatt-/Betriebs-Know-how sind deshalb nicht zweckmässig.

ein intelligentes Lademanagement vorzusehen, um den Leistungsbedarf zu minimieren. Im konkreten Fall sind jedoch die Stromversorgung bzw. die dazu notwendigen Massnahmen im Detail zu prüfen.

Gelegenheitslader brauchen ebenfalls Ladeinfrastruktur in den Depots, damit die Busse mit voller Batterie ausfahren können. Aufgrund der relativ kleinen Batterien bei diesen Bussen ist die benötigte Ladeleistung pro Bus gering. Deshalb stellt auch eine grosse Gelegenheitslader-Flotte keine besonders hohe Anforderung an die Ladeleistung im Depot. Bei den in der Strategie empfohlenen dynamischen Gelegenheitsladern wird sich der Leistungsbedarf ab Oberleitung gegenüber derjenigen von klassischen Trolleybussen etwa verdoppeln, weil nebst dem Strom fürs Fahren auch Strom zum Laden der Batterie benötigt wird. Speziell auf Streckenabschnitten, die von mehreren Linien genutzt werden, kann so eine Verstärkung der Einspeiseleistung nötig werden. In solchen Fällen kann es sinnvoll sein, über kürzere Einspeiseabschnitte nachzudenken, was zusätzliche Stabilität ins Oberleitungsnetz bringen würde.

5.4. Vergleich mit anderen Städten/Regionen

Das Thema E-Mobilität im öffentlichen Verkehr bzw. Batterie-Busse sind zurzeit in verschiedenen Städten der Schweiz ein Thema. Die dabei aktuell verfolgten Strategien umfassen ähnliche Stossrichtungen wie die hier empfohlene Strategie für den VVL.

Die Verkehrsbetriebe Zürich beispielsweise setzen in ihrer Elektrobussstrategie «eBus VBZ» bei den in dichtem Takt verkehrenden und topografisch anspruchsvollen Hauptbuslinien auf den Batterie-Trolleybus bzw. das IMC-Ladekonzept. Die nachfragestarken Buslinien 69 und 80 werden deshalb in den nächsten Jahren auf teilfahrleitungslosen Trolleybusbetrieb umgestellt.¹² Auf Quartier- und Standardbuslinien sollen künftig vermehrt umweltfreundliche Batteriebusse zum Einsatz kommen, die in der Garage – über Nacht oder auch tagsüber – aufgeladen werden können. Auch die Verkehrsbetriebe St.Gallen setzen weiterhin auf ihren nachfragestarken Linien auf das bewährte Ladekonzept ab einer Fahrleitung und werden im Rahmen der Flottenerneuerung per Dezember 2020 17 neue Batterie-Trolleybusse einsetzen.¹³

BERNMOBIL setzt ebenfalls weiterhin auf das Trolleybussystem und beschaffte im 2018 modernste Batterie-Trolleybusse (Gelenk- und Doppelgelenkfahrzeuge), die einen teilfahrleitungslosen Betrieb ermöglichen. Zurzeit testet BERNMOBIL auf der Linie 17 den E-Busseinsatz

¹² Quelle: <https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/index/mobilitaet-der-zukunft/elektromobilitaet.html>

¹³ Quelle: <https://www.vbsg.ch/home/unternehmen/flotte.html>

mit sogenannten Gelegenheitslader, welche die Batterien jeweils an der Endhaltestelle nachladen.¹⁴

Die Verkehrsbetriebe Basel, welche über kein Trolleybusnetz verfügen, verfolgen aktuell das Ziel, mittelfristig das bestellte Bus-Angebot vollumfänglich mit Elektrobussen mit Depotladung und allfälligen Varianten davon zu erbringen.¹⁵ Zurzeit steht ein Depotlader-Gelenkbus im Testeinsatz. Auch die Zugerland Verkehrsbetriebe verfolgen eine Strategie mit Depotladern. Die ZVB werden ab Herbst 2019 einen Batteriebus im Regelbetrieb einsetzen, um Fragen im Bereich Unterhalt und Betrieb vertiefter zu klären.¹⁶

5.5. Periodische Überprüfung der Strategie

Die vorliegende E-Bus-Strategie basiert auf dem aktuellen Wissensstand zu den möglichen Antriebsformen, welche künftig einen energieeffizienten, emissionsarmen Busbetrieb mit erneuerbarer Energie ermöglichen. Angesichts der teilweise noch grossen Unsicherheiten in Bezug auf die Entwicklungen der entsprechenden Technologien, namentlich zur Reichweite von Batteriebusen und zu den Preisen der Batterien, soll die E-Bus-Strategie für den VVL periodisch überprüft werden. Die technische Entwicklung der Batteriebusse, aber auch von alternativen Antriebsoptionen, sind weiterzuverfolgen. Je nach Entwicklungen ist die E-Bus-Strategie zu aktualisieren. Insbesondere für die Evaluation von konkreten Projekten ist der jeweils aktuelle Wissensstand heranzuziehen.

¹⁴ Quelle: <https://www.bernmobil.ch/DE/Unternehmen/Portrait/Fahrzeugpark/Busse/10291/?oid=20343&lang=de>

¹⁵ Quelle: Vortrag anlässlich Experten-Seminar der HSLU zum Thema Dekarbonisierung/Elektrifizierung des städtischen ÖV vom 22.03.2019.

¹⁶ Quelle: <https://www.zvb.ch/aktuell/e-mobilitaet/>

Glossar

BtL	Biomass to Liquid: Prozess zur Herstellung von flüssigen Treibstoffen aus Biomasse.
BtX	Biomass to X: Prozess zur Herstellung von gasförmigen oder flüssigen Treibstoffen aus Biomasse.
CKW	Centralschweizerische Kraftwerke AG
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EN 590	«Dieselnorm»
ewl	Energie Wasser Luzern Holding AG
FAME	Fatty acid methyl ester (Fettsäuremethylester): der gängigste Biodiesel
HBEFA	Handbuch Emissionsfaktoren
HLK	Heizung, Lüftung, Klima
HVO	hydrogenated vegetable oil (hydriertes Pflanzenöl): eine seltene Art von Biodiesel
HVZ	Hauptverkehrszeit
IMC	In motion charging (dynamischer Gelegenheitslader)
LKW	Lastwagen
THG	Treibhausgas
NBW	Nettobarwert-Methode
NO _x	Stickoxide
PEMFC	polymer electrolyte membrane fuel cell
PM	Feinstaub («particulate matter»)
PSI	Paul-Scherrer-Institut
PtX	Power-to-X: Prozess zur Herstellung von gasförmigen oder flüssigen Treibstoffen aus Strom und CO ₂ aus der Luft.
RED	«Renewable Energy Directive»: Richtlinie der EU zur Förderung erneuerbarer Energie
SO _x	Schwefeloxide
vbl	Verkehrsbetriebe Luzern
VBZ	Verkehrsbetriebe der Stadt Zürich
VVL	Verkehrsverbund Luzern

Annex 1: Annahmen zur Entwicklung der Batterien

Verwendete Quellen

- INFRAS 2018: Marktübersicht Bus der Zukunft
- Bloomberg New Energy Finance 2017
- Fraunhofer 2017: Energiespeicher Roadmap
- THELMA 2016: Opportunities and challenges for electric mobility
- Cox B. 2018: Mobility and the Energy transition. Diss. ETH NO 25081
- Einbezug von Experten für elektrische Antriebe / Speicher im Rahmen der Begleitgruppe (siehe Impressum auf Seite 3).

Details zu Energiedichte, spezifische Kosten pro kWh, Batteriegewichte und Batteriekosten sind für die beiden Szenarien «Basis» und «optimistisch» auf den folgenden Seiten zusammengestellt.

Szenario «Basis»

Batterien mit hoher Energiedichte (für Depotlader)

Annahmen Dichte/Kosten			4-Tonnen-Batterie				3-Tonnen-Batterie			
Jahr	Energiedichte (Wh/kg)	Kosten (CHF/kWh)	Batterie-Kapazität (kWh)	Reichweite pro Ladung GB (km)	Reichweite pro Ladung NB (km)	Batterie-Kosten (CHF)	Batterie-Kapazität (kWh)	Reichweite pro Ladung NB (km)	Reichweite pro Ladung MB (km)	Batterie-Kosten (CHF)
2020	100	800	400	96	120	320'000	300	90	100	240'000
2021	110	738	439	106	132	324'058	329	99	110	243'043
2022	119	682	476	115	144	324'804	357	108	120	243'603
2023	128	632	511	125	156	322'987	384	117	130	242'240
2024	136	586	545	133	167	319'220	409	125	139	239'415
2025	144	544	577	142	177	314'007	433	133	148	235'505
2026	152	507	607	150	188	307'759	456	141	156	230'819
2027	159	473	636	158	198	300'806	477	148	165	225'605
2028	166	442	664	166	207	293'417	498	155	173	220'063
2029	172	414	690	173	217	285'804	517	162	180	214'353
2030	179	389	715	180	225	278'135	536	169	188	208'601
2031	185	366	738	187	234	270'540	554	176	195	202'905
2032	190	346	761	194	242	263'119	571	182	202	197'339
2033	196	327	782	200	251	255'947	587	188	209	191'960
2034	201	310	803	207	258	249'078	602	194	215	186'809
2035	206	295	822	213	266	242'550	617	199	222	181'912
2036	210	281	841	219	273	236'386	630	205	228	177'290
2037	215	269	858	224	280	230'601	644	210	234	172'951
2038	219	257	875	230	287	225'198	656	215	239	168'898
2039	223	247	891	235	294	220'176	668	220	245	165'132
2040	226	238	906	240	300	215'527	679	225	250	161'645
2041	230	230	920	245	307	211'240	690	230	256	158'430
2042	233	222	934	250	313	207'303	700	235	261	155'477
2043	237	215	947	255	319	203'698	710	239	266	152'773
2044	240	209	959	260	324	200'408	719	243	270	150'306
2045	243	203	971	264	330	197'416	728	248	275	148'062

Batterien mit hoher Leistung (für Gelegenheitslader)

Annahmen Dichte/Kosten			75 kWh-Batterie		
Jahr	Energiedichte (Wh/kg)	Kosten (CHF/kWh)	Batteriegewicht (kg)	Reichweite pro Ladung GB (km)	Batterie-Kosten (CHF)
2020	80	1'600	938	18	120'000
2021	88	1'467	849	18	110'008
2022	96	1'346	780	18	100'967
2023	104	1'237	723	18	92'786
2024	111	1'138	677	18	85'384
2025	118	1'049	638	18	78'686
2026	124	968	605	18	72'625
2027	130	895	576	18	67'141
2028	136	829	551	18	62'180
2029	142	769	530	18	57'690
2030	147	715	511	18	53'627
2031	152	666	494	18	49'951
2032	157	622	479	18	46'625
2033	161	582	465	18	43'616
2034	166	545	453	18	40'893
2035	170	512	442	18	38'429
2036	174	483	432	18	36'199
2037	177	456	423	18	34'182
2038	181	431	415	18	32'356
2039	184	409	407	18	30'705
2040	187	389	400	18	29'210
2041	191	371	394	18	27'858
2042	193	355	388	18	26'634
2043	196	340	382	18	25'527
2044	199	327	377	18	24'525
2045	201	315	373	18	23'619

Szenario «optimistisch»

Batterien mit hoher Energiedichte (für Depotlader)

Annahmen Dichte/Kosten			4-Tonnen-Batterie				3-Tonnen-Batterie			
Jahr	Energiedichte (Wh/kg)	Kosten (CHF/kWh)	Batterie-Kapazität (kWh)	Reichweite pro Ladung GB (km)	Reichweite pro Ladung NB (km)	Batterie-Kosten (CHF)	Batterie-Kapazität (kWh)	Reichweite pro Ladung NB (km)	Reichweite pro Ladung MB (km)	Batterie-Kosten (CHF)
2020	120	750	480	115	144	360'000	360	108	120	270'000
2021	131	688	525	127	159	361'186	394	119	133	270'889
2022	142	632	568	139	174	358'791	426	130	145	269'093
2023	152	582	608	150	188	353'658	456	141	157	265'243
2024	162	536	647	162	202	346'479	485	151	168	259'859
2025	171	494	684	172	216	337'818	513	162	180	253'364
2026	180	457	718	183	229	328'135	539	172	191	246'101
2027	188	423	752	194	242	317'799	564	181	202	238'349
2028	196	392	783	204	255	307'106	587	191	212	230'329
2029	203	364	813	214	267	296'291	610	200	223	222'218
2030	210	339	842	223	279	285'538	631	209	233	214'153
2031	217	316	869	233	291	274'987	652	218	243	206'241
2032	224	296	895	242	303	264'747	671	227	252	198'560
2033	230	277	920	252	314	254'896	690	236	262	191'172
2034	236	260	943	261	326	245'488	707	244	271	184'116
2035	241	245	965	269	337	236'562	724	253	281	177'421
2036	247	231	987	278	348	228'138	740	261	290	171'104
2037	252	219	1'007	287	358	220'227	755	269	299	165'170
2038	256	207	1'026	295	369	212'829	769	277	307	159'622
2039	261	197	1'044	303	379	205'936	783	284	316	154'452
2040	265	188	1'062	311	389	199'538	796	292	324	149'653
2041	270	180	1'078	320	399	193'616	809	300	333	145'212
2042	273	172	1'094	327	409	188'151	820	307	341	141'113
2043	277	165	1'109	335	419	183'121	832	314	349	137'341
2044	281	159	1'123	343	429	178'504	842	322	357	133'878
2045	284	153	1'136	351	438	174'275	852	329	365	130'706

Batterien mit hoher Leistung (für Gelegenheitslader)

Annahmen Dichte/Kosten			75 kWh-Batterie		
Jahr	Energiedichte (Wh/kg)	Kosten (CHF/kWh)	Batteriegewicht t (kg)	Reichweite pro Ladung GB (km)	Batterie-Kosten (CHF)
2020	100	1'200	750	18	90'000
2021	110	1'100	683	18	82'506
2022	119	1'010	630	18	75'725
2023	128	928	587	18	69'589
2024	136	854	550	18	64'038
2025	144	787	520	18	59'014
2026	152	726	494	18	54'469
2027	159	671	472	18	50'356
2028	166	622	452	18	46'635
2029	172	577	435	18	43'267
2030	179	536	420	18	40'221
2031	185	500	406	18	37'464
2032	190	466	394	18	34'969
2033	196	436	383	18	32'712
2034	201	409	374	18	30'670
2035	206	384	365	18	28'822
2036	210	362	357	18	27'149
2037	215	342	350	18	25'636
2038	219	324	343	18	24'267
2039	223	307	337	18	23'029
2040	226	292	331	18	21'908
2041	230	279	326	18	20'893
2042	233	266	321	18	19'976
2043	237	255	317	18	19'145
2044	240	245	313	18	18'394
2045	243	236	309	18	17'714

Annex 2: Wichtigste Annahmen für die Kostenrechnung

Allgemeine Annahmen

	Einheit	Gelenkbus	Standardbus	Midibus
spezifischer Energiebedarf inkl. Heizung/Lüftung/Klima	kWh/km	2.5	2.0	1.8
spezifischer Energiebedarf mit Zusatzheizung foss. oder Bio-Treibstoff	kWh/km			
spezifischer Energieverbrauch Diesel	l/100km	46.0	36.0	30.0
spezifischer Energieverbrauch Diesel-Hybrid (20% Treibstoffeinsparung ggü. Diesel)	l/100km	36.8	28.8	24.0
Nutzbare Energie der Batterieladung für Betrieb	%	60%		
Ladeleistung in Fahrt bei IMC	kW	120		
Ladeleistung Ladestation Endhaltestelle	kW	450		
Ladeleistung Ladestation im Depot	kW	150		
Fahrzeugreserve	%	10%		
Anzahl Fahrzeuge pro Ladepunkt im Depot für Depotlader	#	1		
Anzahl Fahrzeuge pro Ladepunkt im Depot für Gelegenheitslader	#	3		
Lebensdauer Fahrzeuge	Jahre	12		
Lebensdauer Batterien	Jahre	6		
Lebensdauer Oberleitung	Jahre	30		
Lebensdauer Ladestationen Depot	Jahre	12		
Lebensdauer Ladestationen Haltestellen: Stromanschluss/Einbau	Jahre	30		
Lebensdauer Ladestationen Haltestellen: Ladestation	Jahre	12		
Lebensdauer Gleichrichterstation	Jahre	30		
Lebensdauer Stromanschluss im Depot/für Gleichrichter	Jahre	30		
Zus. Fahrpersonalaufwand für Fahrt in bzw. aus Depot pro ausgetauschtes Fahrzeug	min	20		
Abnahme Fahrzeugkosten real pro Jahr	%	1%		
Abnahme spezifischer Energieverbrauch real pro Jahr	%	1%		
Realer Zinssatz	%	1.5%		

Kostenannahmen E-Busse

		Varianten			Bemerkungen
		Gelegenheitsladung konduktiv-dynamisch	Gelegenheitsladung konduktiv-statisch	Depotladung konduktiv-statisch	
Busbeschaffung 2020 ohne Batterie: Gelenkbus	CHF/Bus	CHF 620'000	CHF 620'000	CHF 600'000	div. Richtofferten Stand 2018
Busbeschaffung 2020 ohne Batterie: Normalbus	CHF/Bus		CHF 470'000	CHF 450'000	
Busbeschaffung 2020 ohne Batterie: Midibus	CHF/Bus		CHF 450'000	CHF 430'000	
Stromkosten	CHF/kWh	CHF 0.15	CHF 0.15	CHF 0.15	ewl/CKW (Email 24.08.18) INFRAS-Annahme ohne Minöst.
Dieselmkosten	CHF/l				
Wartung-/Unterhaltskosten Fahrzeug: Gelenkbus	CHF/km	CHF 0.48	CHF 0.46	CHF 0.40	Annahme INFRAS, ohne Batterieersatz ca. 75% des GB gleich wie NB, wenn 3türig (vbl)
Wartung-/Unterhaltskosten Fahrzeug: Normalbus	CHF/km	CHF 0.36	CHF 0.35	CHF 0.30	
Wartung-/Unterhaltskosten Fahrzeug: Midibus	CHF/km		CHF 0.35	CHF 0.30	
Oberleitung Investition	CHF/km	CHF 800'000			pro Fahrriichtung (vbl) 2% der Investition für beidseitige Leitungsführung (vbl) 2% der Investition Stromversorgung
Oberleitung Unterhalt	CHF/a/km	CHF 16'000			
Stromversorgung mit Trafo und Gleichrichter	CHF/km	CHF 600'000			
Unterhalt Gleichrichter	CHF/a/km	CHF 12'000			
Schnellladestation (450 kW) Investition	CHF/Stk		CHF 800'000		aus Überlegungen vbl zur Li 14 2% der Investitionskosten in Investitionsk. enthalten
Schnellladestation (450 kW) Unterhalt	CHF/a/Stk		CHF 16'000		
Schnellladestation (450 kW) Anschlusskosten	CHF/Stk		CHF 0		
Ladeplatz im Depot (150 kW) Investition	CHF/Stk	CHF 85'000	CHF 85'000	CHF 85'000	Firma Schaltbau (Anschluss Mittelsp.) 5% der Investitionskosten ewl/CKW (Email 24.08.18) ewl/CKW (Email 24.08.18)
Ladeplatz im Depot (150 kW) Unterhalt	CHF/a/Stk	CHF 4'250	CHF 4'250	CHF 4'250	
Anschlusskosten im Depot 1'000 kW Anschlussleist.	CHF	CHF 210'000	CHF 210'000	CHF 210'000	
Anschlusskosten im Depot 4'000 kW Anschlussleist.	CHF	CHF 650'000	CHF 650'000	CHF 650'000	
Fahrpersonalkosten (bei zus. Fahrzeugumläufen)	CHF/h	CHF 70.00	CHF 70.00	CHF 70.00	
Fahrzeug-Fixkosten (bei zusätzlichem Fahrzeugbedarf) (Garagierung, Versicherung, Unterhalt etc.)	CHF/a/Bus	CHF 30'000.00	CHF 30'000.00	CHF 30'000.00	davon 18'000 CHF/a für Garagierung (1'000 CHF/m)

Die Beschaffungskosten beziehen sich auf den Bus ohne Batterie. Die Batteriecosten sind aus dem Annex 1 ersichtlich.

Kostenannahmen Dieselbusse und Plug-in-Hybrid

		Varianten		Bemerkungen
		Diesel-Hybrid Plug-in	Diesel = Referenz	
Busbeschaffung 2020 ohne Batterie: Gelenkbus	CHF/Bus	CHF 570'000	CHF 500'000	div. Richtofferten Stand 2018
Busbeschaffung 2020 ohne Batterie: Normalbus	CHF/Bus	CHF 410'000	CHF 350'000	
Busbeschaffung 2020 ohne Batterie: Midibus	CHF/Bus	CHF 390'000	CHF 330'000	
Stromkosten	CHF/kWh	CHF 0.15		ewl/CKW (Email 24.08.18)
Dieselskosten	CHF/l	CHF 1.35	CHF 1.35	INFRAS-Annahme ohne Minöst.
Wartung-/Unterhaltskosten Fahrzeug: Gelenkbus	CHF/km	CHF 0.65	CHF 0.50	Annahme INFRAS, ohne Batterieersatz ca. 75% des GB gleich wie NB, wenn 3türlich (vbl)
Wartung-/Unterhaltskosten Fahrzeug: Normalbus	CHF/km	CHF 0.49	CHF 0.38	
Wartung-/Unterhaltskosten Fahrzeug: Midibus	CHF/km	CHF 0.49	CHF 0.38	
Ladeplatz im Depot (150 kW) Investition	CHF/Stk	CHF 85'000		Firma Schaltbau (Anschluss Mittelsp.) 5% der Investitionskosten ewl/CKW (Email 24.08.18) ewl/CKW (Email 24.08.18)
Ladeplatz im Depot (150 kW) Unterhalt	CHF/a/Stk	CHF 4'250		
Anschlusskosten im Depot 1'000 kW Anschlussleist.	CHF	CHF 210'000		
Anschlusskosten im Depot 4'000 kW Anschlussleist.	CHF	CHF 650'000		