

Kanton St.Gallen, Volkswirtschaftsdepartement
Amt für öffentlichen Verkehr

E-Bus-Strategie Kanton St.Gallen

Schlussbericht
Zürich, 2. April 2020

Matthias Lebküchner
Cornelia Graf
Hans-Jörg Althaus
Brian Cox



Impressum

E-Bus-Strategie Kanton St.Gallen

Schlussbericht

Zürich, 2. April 2020

3364a_E-Bus-Strategie-SG_Schlussbericht_final_nach_Vernehmlassung.docx

Auftraggeber

Kanton St.Gallen, Volkswirtschaftsdepartement

Amt für öffentlichen Verkehr

Projektleitung

Silvan Egli, AÖV Kanton St.Gallen

Autorinnen und Autoren

M. Lebküchner, C. Graf, H.-J. Althaus, B. Cox

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich, 3012 Bern

Tel. +41 44 205 95 95

Begleitgruppe

Patrick Ruggli, AÖV Kanton SG

Daniel Litscher, TBA Kanton SG

Florian Jud, AÖV Kanton SG

Alexandra Asfour, SAK AG

Philipp Sutter, VBSG

Jonny Dörig, Regiobus

Rico Kellenberger, BOS

Eveline Wüest, Postauto

Inhalt

Zusammenfassung	5
1. Ausgangslage, Auftrag	10
2. Vorgehen	12
2.1. Ökonomische Bewertung	12
2.2. Ökologische Bewertung	13
2.3. Weitere Kriterien	15
3. Antriebsoptionen	16
3.1. Batteriebusse	19
3.1.1. Eigenschaften von Batterien und Annahmen zu deren Entwicklung	21
3.1.2. Depotlader	24
3.1.3. Gelegenheitslader statisch	25
3.1.4. Kombi-Lader	26
3.1.5. Gelegenheitslader dynamisch (IMC, Batterietrolleybus)	27
3.1.6. Anforderungen an die Stromversorgung zum Laden der Batterien	27
3.1.7. Betriebliche Aspekte	28
3.1.8. Anforderungen an Depots und Werkstätten	28
3.2. Brennstoffzellenbusse	29
3.3. Bio- und synthetische Treibstoffe	30
3.4. Plug-In-Hybrid	32
4. Zweckmässige Einsatzfelder im Kanton St.Gallen	34
4.1. Beispiellinien	34
4.1.1. Stadt-Linie 80.009 (Standardbus)	36
4.1.2. Stadt-Linie 80.007/8 (Gelenkbus)	40
4.1.3. Agglo-Linie 80.151 (Gelenkbus)	45
4.1.4. Regional-Linie 80.732 (Gelenkbus)	50
4.1.5. Regional-Linie 80.300 (Standardbus)	54
4.1.6. Quartier-Linie 80.702 (Midibus)	58
4.2. Erkenntnisse Zweckmässigkeitsbetrachtung Linien	62

4.2.1.	Ökonomische Bewertung	62
4.2.2.	Ökologische Bewertung	64
4.2.3.	Weitere Kriterien	65
4.3.	Fazit	66
5.	Strategie	69
5.1.	Langfristige Strategie	69
5.1.1.	Stadt- und Agglomerationslinien	69
5.1.2.	Regionallinien	70
5.1.3.	Quartierlinien	70
5.2.	Zwischenschritte 2025/2030	71
5.3.	Anforderungen an die Stromversorgung	71
5.4.	Vergleich mit anderen Städten/Regionen	72
5.5.	Periodische Überprüfung der Strategie	73
6.	Rolle des Kantons als Besteller	74
A1.	Annahmen zur Entwicklung der Batterien	75
A1.1.	Verwendete Quellen	75
A1.2.	Batterien mit hoher Energiedichte (für Depotlader)	75
A1.3.	Batterien mit hoher Leistung (Gelegenheitslader)	76
A1.4.	Batterie, Brennstoffzelle und Wasserstofftank	77
A2.	Annex 2: Annahmen für die Kostenrechnung	78
A2.1.	Allgemeine Annahmen	78
A2.2.	Kostenannahmen Busse	79
A2.3.	Kostenannahmen Ladeinfrastruktur	79
	Glossar	80
	Literatur	81

Zusammenfassung

Die Strategie zeigt auf, mit welchen Antriebsoptionen das strategische Fernziel «100% Elektrobusse oder Busse mit alternativen Antrieben im ÖV» am ehesten erreicht werden kann. Sie fokussiert auf monetäre, technische und betriebliche Aspekte. Ökologische Aspekte sind bereits durch das strategische Fernziel abgedeckt und darum nicht im Fokus der Strategie.

E-Busse im Vergleich zum heutigen Dieselbus

Im Zeithorizont 2030 werden die Vollkosten von Elektrobussen aufgrund der teureren Fahrzeuge und Ladeinfrastrukturen je nach Einsatzfeld 10% bis 25% höher sein als von Dieselbuslinien. Der Dieselpreis für konzessionierte Transportunternehmen müsste auf über 2.50 CHF/Liter ansteigen, damit die Elektrobusse aus betriebswirtschaftlicher Sicht besser abschneiden als Dieselbusse. Das ist nur realistisch, wenn Diesel mit einer substanziellen Lenkungsabgabe verteuert und die Rückerstattung der Mineralölsteuer aufgehoben wird.

Mit Elektrobussen lassen sich jedoch deutliche Umweltvorteile gegenüber den Dieselbussen erzielen. Einerseits reduziert der Elektroantrieb den Primärenergieverbrauch um 30% bis 40%. 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 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 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 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, keine zusätzlichen Busumläufe) 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 (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 zusammen mit den Transportunternehmen zu evaluieren. Dabei sind jeweils die spezifischen Randbedingungen vor Ort zu berücksichtigen. Auch der Ansatz Kombilader ist hier jeweils miteinzubeziehen.

Langfristige Strategie zur Umsetzung der Vision

Dem vorliegenden Projekt liegt das strategische Fernziel «100% Elektrobusse oder Busse mit alternativen Antrieben im ÖV» anstelle eines konkreten Ziels zugrunde. Entsprechend fokussiert diese Strategie nicht auf einen detaillierten Umsetzungspfad, sondern diskutiert Fahrzeug- und Einsatzoptionen, mit denen dieses strategische Fernziel am ehesten erreicht werden könnte.

- **Stadt und Agglomeration St.Gallen:** Das Busliniennetz in diesem Raum soll langfristig aus einer Mischflotte mit dynamischen Gelegenheitsladern (IMC oder Batterietrolleybus) und Depotladern bestehen:
 - Bei anstehendem Fahrzeugersatz von Trolleybussen IMC-fähige Fahrzeuge 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.
 - Restliche Linien mit Depotlader.

Mit dieser Strategie bleiben bestehende Trolleybus-Systeme vom Grundsatz her erhalten. Sie werden 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.

- **Übrige städtische Gebiete:** In den übrigen städtischen Gebieten im Kanton St.Gallen ohne bestehendes Oberleitungsnetz soll auf Depotlader umgestiegen werden. Falls die spezifischen Rahmenbedingungen (ausreichende Wendezeiten für das Nachladen der Batterien an den Endhaltestellen) auch für einen statischen Gelegenheitslader gegeben sind, sollen die beiden Optionen vertieft geprüft werden.
- **Regionallinien:** Die Agglomerations- und Regionallinien sind auf Depotlader-Busse umzustellen. Allenfalls sind sog. Kombilader-Konzepte zu prüfen, um die Reichweiten zu erhöhen bzw. die Batteriegrösse zu reduzieren. Für Linien, welche Reichweiten über 400 – 450 km erfordern, sind Depotlader-Batteriebus mit Range Extender (mit Brennstoffzelle oder über Verbrennungsmotor und mit Biotreibstoff angetriebener Generator) zu prüfen. Als Alternative sind auch konventionelle Brennstoffzellenbusse denkbar.
- **Quartierlinien:** Für Quartierlinien ist jeweils unter Berücksichtigung der spezifischen Rahmenbedingungen die Umstellung auf Depotlader oder statischen Gelegenheitslader zu prüfen.

Zwischenschritte 2025/2030

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

- **Erweiterung des Trolleybusnetzes durch IMC** im Raum St.Gallen, wo diese Technologie auch längerfristig gegenüber dem Depotlader Vorteile bringt (geringer Anteil an neu zu erstellender Oberleitung, keine HVZ-Verstärker).
- **Übrige städtische Gebiete und Regionallinien:** Pilot mit **Depotladern** für Linien, für welche in diesem Zeithorizont möglichen Reichweiten einen zweckmässigen Einsatz ohne zusätzlichen

Fahrzeugbedarf erlauben. Kurzfristig wären auch Pilotversuche mit **Kombiladern** (mit beispielsweise mobilen Ladestationen an den Endhaltestellen) denkbar.

- Um kurzfristig bereits Umweltvorteile erzielen zu können, sind auch Plug-in-Hybrid-Busse (mit entsprechenden Vorinvestitionen für die Ladeinfrastruktur im Depot für späteren Umstieg auf Depotlader) zu prüfen.

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. An den typischen Standorten von Busdepots sowohl in der Stadt als auch in der Region (Gewerbe-/Industriegebiete) ist in der Regel eine Anschlussleistung von 5 MW möglich. Um den Leistungsbedarf zu minimieren ist ergänzend ein intelligentes Lademanagement vorzusehen. Im konkreten Fall sind die Stromversorgung bzw. die dazu notwendigen Massnahmen im Detail zu prüfen.

Gelegenheitslader brauchen ebenfalls Ladeinfrastruktur in den Depots. Aufgrund der relativ kleinen Batterien bei diesen Bussen ist die benötigte Ladeleistung pro Bus gering. Deshalb stellt auch eine grosse Gelegenheitslader-Flotte keine besonders hohen Anforderungen 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.

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 Batteriebussen und zu den Preisen der Batterien, soll die E-Bus-Strategie für den Kanton St.Gallen periodisch überprüft werden.

Rolle des Kantons als Besteller

- **Bestellerstrategie:** Die nun vorliegende Strategie gibt den Rahmen für die Beschaffung und den Einsatz von Bussen mit alternativen Antrieben vor. Sie gilt vorläufig für das Bestellverfahren 2022/2023. Offen ist noch, ob die vorliegende Strategie auch für das anschliessende Bestellverfahren 2024/2025 angewendet werden soll. Es ist nicht auszuschliessen, dass aufgrund der technischen Entwicklung eine Anpassung der Strategie notwendig wird.
- **Bestellervorgaben:** Aus Sicht des Kantons als Besteller des öffentlichen Verkehrs sollen folgende Vorgaben gelten:
 - Will ein Unternehmen Busse (Fahrzeuersatz oder -erweiterung) mit alternativen Antrieben (E-Busse, Brennstoffzellen-Busse oder Hybrid-Busse) beschaffen, so ist dem Kanton St.Gallen vorgängig ein Konzept zu unterbreiten. Mit dem Konzept ist aufzuzeigen, welche Fahrzeuge beschafft werden, welche Infrastruktur für den Betrieb erforderlich ist und welche Mehrkosten gegenüber dem bisherigen Betrieb jährlich anfallen. Das Konzept ist zwingend mit dem Kanton St.Gallen abzustimmen. Sofern erforderlich wird sich der Kanton St.Gallen mit dem BAV oder mitbestellende Nachbarkantonen absprechen. Priorität bei der Beschaffung haben E-Busse gemäss der vorliegenden Strategie.
 - Für die Bestellperiode 2022/2023 wird es von den Abläufen/Fristen her erst vereinzelt möglich sein, E-Busse gemäss Strategie zu beschaffen; deshalb werden Busbeschaffungen in diesem Horizont i.d.R. noch 1:1 Ersatz-Beschaffungen sein (d.h. Dieselbusse oder bei den VBSG auch Trolleybusse). Jedoch sollen von den Transportunternehmen im Rahmen der mittelfristigen Investitionsplanungen entsprechende Hinweise zuhanden Besteller gemacht werden, wenn spätere Beschaffungen von E-Bussen bereits geplant sind.
 - Der abschliessende Entscheid über die Ladestrategie für E-Busse liegt beim Besteller. Dieser finanziert die Mehrkosten für den Betrieb (die Investitionen bzw. die Abschreibungs- und Unterhaltskosten werden ebenfalls via Abgeltung finanziert).
 - Der Kanton St.Gallen prüft (allenfalls mit den mitbestellenden Nachbarkantonen und dem BAV), ob die Beschaffung strategiekonform und finanzierbar ist.

1. Ausgangslage, Auftrag

Die Regierung des Kantons St.Gallen hat am 18. Dezember 2018 den Projektauftrag zur Erarbeitung des Berichts «Elektromobilität im Kanton St.Gallen» erteilt (Postulatsbericht 43.17 .05). Der Bericht soll die Chancen der Elektromobilität beleuchten. Nebst dem motorisierten Individualverkehr sind auch der öffentliche Verkehr sowie der Radverkehr in die Untersuchung miteinzubeziehen. Die Projektleitung dieses Auftrags liegt beim kantonalen Baudepartement. Die Arbeiten werden durch die EBP Schweiz AG begleitet.

Parallel zum oben erwähnten Bericht beabsichtigt der Kanton St.Gallen, die Aspekte der Elektromobilität in Bezug auf den ÖV zu vertiefen. Deshalb möchte er eine Strategie zur weiteren Einführung von Linienbussen mit Elektroantrieb oder alternativen Antrieben (E-Bus-Strategie) auf seinem Kantonsgebiet erarbeiten lassen. Dabei stellt sich insbesondere die Frage, nach welchen Kriterien weitere Elektrobusse bzw. energieeffiziente und emissionsarme Busse beschafft werden und wo diese prioritär einzusetzen sind.

Die Verkehrsbetriebe St.Gallen (VBSG) sind aktuell bereits mit rund einem Drittel der Fahrzeuge elektrisch bzw. dem System Trolleybus unterwegs. Zudem baut die Stadt St.Gallen ihr Netz mit Elektrobusen weiter aus und ergänzt die Elektrobusflotte mit modernsten Batterie-Trolleybussen¹, welche ab Ende 2020 zum Einsatz gelangen werden. Auch die BUS Ostschweiz AG (BOS) setzt im Raum Altstätten seit Ende 2019 erstmals einen Elektrobus ein.

Die zu erarbeitende E-Bus-Strategie leitet sich auch aus diversen übergeordneten Gesetzen und Konzepten ab, welche alle für den Verkehr das Ziel verfolgen, die Energieeffizienz zu erhöhen und gleichzeitig die Umweltbelastungen zu reduzieren. U.a. verfolgt der Kanton St.Gallen gemäss kantonalem Energiekonzept das Ziel, die CO₂-Emissionen im Vergleich zum Jahr 1990 um 20 Prozent zu senken.

Mit der E-Bus-Strategie sollen die folgenden Ziele erreicht werden:

- Aufzeigen des aktuellen Wissensstands zu erneuerbar und CO₂-arm angetriebenen Bussen;
- Darlegen der Möglichkeiten und Grenzen der Traktion mit erneuerbaren Energien;
- Aufzeigen, wie sich alternative Antriebe für Linienbussen unterscheiden;
- Grobabschätzen der Auswirkungen auf die Kosten und Abgeltungen des öffentlichen Busverkehrs;

¹ Herkömmliche Trolleybusse beziehen den Strom für den Antrieb direkt aus der Fahrleitung. Der Batterie-Trolleybus bezieht hingegen den Strom für den Antrieb ausschliesslich aus seiner Batterie, die während der Fahrt über die Oberleitung geladen wird. Dies erlaubt einerseits auch Streckenanteile ohne Oberleitung zu befahren. Andererseits ermöglicht diese Technologie ein effizienteres Energiemanagement.

- Aussagen, welche Antriebstechnologie für den Busverkehr aus Sicht Umwelt und Wirtschaftlichkeit im Vordergrund steht, um eine möglichst kostengünstige Umstellung auf Busse mit alternativen Antrieben anzustreben;
- Aufzeigen des Entwicklungspfads für eine schrittweise Umsetzung des strategischen Fernziels «100% Elektrobuse oder Busse mit alternativen Antrieben im ÖV», differenziert für die unterschiedlichen Einsatzgebiete (Städte, Agglomerationen, ländliche Regionen).

Die Strategie soll zudem Auskunft geben, welche Akteure einzubeziehen sind und welche Rolle ihnen zukommt.

2. Vorgehen

Basis der zu entwickelnden E-Bus-Strategie ist ein auf den Kanton St.Gallen adaptierter Vergleich verschiedener Antriebsoptionen. Es werden verschiedene spezifische Gegebenheiten des Kantons St.Gallen in den Vergleich einbezogen: das ÖV-Angebot, die Betriebsstruktur, die vorhandenen Infrastrukturen sowie Randbedingungen der Energielieferanten. Die Strategieentwicklung erfolgt anhand der folgenden drei Schritte:

- **1. Überblick aktueller Stand der Antriebsoptionen mit erneuerbaren und CO₂-armen Energien:** Welche Antriebsoptionen kommen grundsätzlich in Frage? Wie sehen die heutige und künftige Verfügbarkeit dieser Optionen auf dem Markt aus? --> Kapitel 3.
- **2. Zweckmässige Einsatzfelder im Kanton St.Gallen:** Die Antriebsoptionen werden hinsichtlich der Kriterien Kosten, Ökologie, Betrieb, Stadtraum/Ästhetik sowie Fahrgastkomfort miteinander verglichen. Diese Evaluation umfasst jedoch nicht die gesamte Busflotte des Kantons St.Gallen. 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 Erkenntnissen zu den zweckmässigen Einsatzfeldern der untersuchten Antriebsoptionen wird die langfristige Strategie zur Erreichung der Vision formuliert, inkl. Entwicklungspfad für eine schrittweise Umsetzung. --> Kapitel 5

2.1. Ökonomische Bewertung

Der ökonomischen Bewertung liegen folgende Methoden und Annahmen zugrunde:

- Dynamische Kostenrechnung nach der Nettobarwert-Methode (NBW) über zwei Fahrzeuggenerationen;
- Es werden nur Kosten-Elemente berücksichtigt, welche sich zwischen den Optionen unterscheiden:
 - Fahrzeugkosten: Beschaffung, Energie Betrieb, Wartung/Unterhalt
 - Infrastruktur Energieversorgung: Investitionen, Betrieb/Unterhalt
 - Zusätzliche Betriebskosten aufgrund eines erhöhten Fahrzeugbedarfs
 - Garagierungskosten bei zusätzlichem Fahrzeugbedarf
- Annahme Lebensdauer der Fahrzeuge: 12 Jahre
- Annahme Lebensdauer der Batterien: 6 Jahre
- Basis für betriebliche Analysen: Fahrpläne 2019

2.2. Ökologische Bewertung

Da der Fokus dieser Studie auf Energieeffizienz und Treibhausgasemissionen (THG) 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 anfallen. Bei Verbrennungsmotoren stammen z.B. über 95% der THG-Emission aus dem Betrieb des Fahrzeuges. Bei Batteriefahrzeugen, die mit erneuerbarem Strom betrieben werden, stammen die Emissionen aus der Strom- sowie 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 (Batterie, Motor etc.) sowie die Produktion der Treibstoffe und der zum Betrieb benötigten Elektrizität enthalten. Für die Elektrizität wird der «zertifizierte erneuerbare Strommix Schweiz» verwendet, ein Mix aus erneuerbaren Stromquellen in der Schweiz: Wasser- und Windkraft, Biogas, Holz, Photovoltaik und Wärme-Kraft-Kopplung.

Teilweise enthalten sind auch generische Emissionen aus der Herstellung und der Nutzung der Ladeinfrastruktur (nur Stromverteilung und Transformation). 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 Guthchriften 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 um den Faktor 2 bis 3 überschätzt (Althaus & Gauch 2010). Die grossen Unterschiede zeigen sich bei gesundheitsschädlichen Emissionen und beim Verbrauch metallischer Ressourcen. Bei den Treibhausgasemissionen unterscheiden sich die Ergebnisse relativ wenig und die Unterschiede zwischen Batteriefahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren sind mit beiden Modellierungsansätzen sehr ähnlich. 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 dem Kanton St.Gallen 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 Version 4.1). Abrieb von Reifen, Bremsen⁴, Strasse und von Kontakten und Fahrdrähten bei Trolleybussen⁵ werden nicht berücksichtigt, weil sie für alle Antriebsoptionen 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. Die 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 Elektrobusse 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 relativ hohem Tempo (über 50 km/h, typischerweise auf Überlandstrecken) sind die Unterschiede zwischen Elektro- und Verbrennungsmotorbussen nur noch gering.

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)) schätzen wir, dass der Abrieb von Kupfer und Kohlestaub aufgrund des Kontaktes und des Fahrdrahtes beim Trolleybus im Vergleich zu den PM-Emissionen von Dieselbussen rund 10-mal geringer ist.

2.3. Weitere Kriterien

Folgende weiteren Kriterien wurden qualitativ einbezogen:

- Betriebliche und angebotsplanerische Aspekte wie z.B. Einsatzflexibilität,
- Auswirkungen auf den Stadtraum wie beispielsweise visuelle Aspekte von Ladestationen oder Oberleitungen,
- Fahrgastkomfort.

In der Bewertung nicht miteinbezogen werden generelle Akzeptanz- bzw. Image-Aspekte der E-Mobilität. Die E-Bus-Optionen werden zudem unter den aktuellen Rahmenbedingungen bewertet. Mögliche Regulierungen des Bundes könnten diese Rahmenbedingungen verändern.

3. Antriebsoptionen

Der Auftrag, dass künftig im Kanton St.Gallen nur noch energieeffiziente und emissionsarme Busse beschafft werden 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 wird;
- Treibstoffe aus biogenen Abfällen und Reststoffen oder aus erneuerbarem Strom und CO₂ aus der Luft: Biodiesel, Bioethanol, Biogas, Biomass to Liquids (BtL), Power to Liquids (PtL).

Damit stehen prinzipiell vier Antriebsoptionen zur Diskussion:

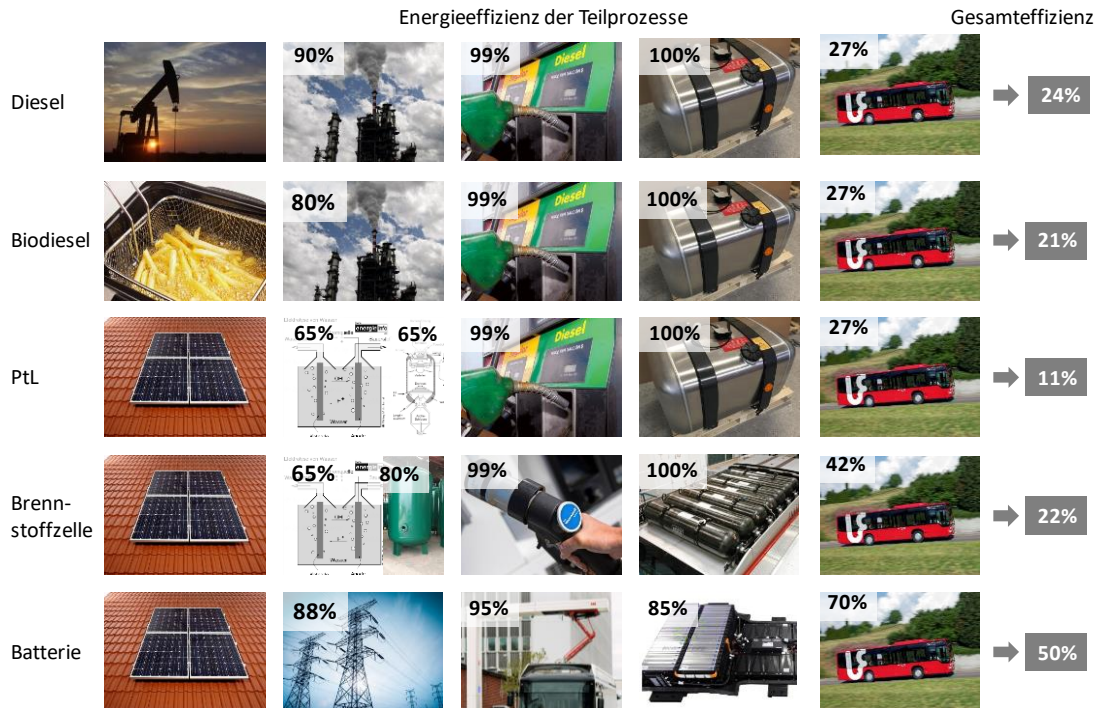
- Klassische Oberleitungsbusse (Trolleybusse)
- Batteriefahrzeuge
- Brennstoffzellenfahrzeuge
- Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren und erneuerbaren Treibstoffen

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 der Forderung nach Energieeffizienz lässt sich eine Rangfolge der Antriebsoptionen erstellen (vgl. Abbildung 1): Elektroantriebe sind generell viel effizienter als Verbrennungsmotoren. Allerdings sind Brennstoffzellenfahrzeuge höchstens halb so energieeffizient wie reine Batteriefahrzeuge. Grund dafür sind die Energieverluste, die bei der Umwandlung von Strom zu Wasserstoff und zurück zu Strom entstehen. 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 dies z.B. bei den synthetischen Treibstoffen aus Biomasse (BtL) oder Strom (PtL) der Fall ist), wird die Gesamteffizienz sehr tief⁶.

⁶ Die Effizienzzahlen der Teilprozesse in Abbildung 1 können multipliziert werden, um die Gesamteffizienz zu berechnen. Je Mehr Umwandlungsschritte mit schlechter Effizienz, desto geringer wird die Gesamteffizienz der Energiekette.

Abbildung 1: Energieeffizienz verschiedener Antriebs- bzw. Treibstoffoptionen (Well-to-Wheel)



Grafik INFRAS.




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 oder auch Wasserstofftanks.
- Fahrzeuge, die mit Biotreibstoffen (Biogas oder Biodiesel) betrieben werden, emittieren wenig CO₂ (da biogenes CO₂ nicht gezählt wird⁷), hingegen sind Schadstoffe wie NO_x, SO_x, PM und auch andere Treibhausgase wie Methan (v.a. bei Biogas) relevant.

⁷ Biogenes CO₂ wird nicht als Treibhausgas gezählt, da die negativen CO₂ Emissionen, die entstehen, wenn die Biomasse wächst auch nicht gezählt werden. Hingegen werden die fossilen CO₂ Emissionen bei der Biomasseproduktion (z.B. Dieselverbrennung durch Traktoren) gezählt.

Abbildung 2: 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 besten Optionen sind die Brennstoffzellenfahrzeuge, deren Treibstoff durch Elektrolyse mit erneuerbarem Strom erzeugt wird, sowie Hybrid-Antriebe mit Biotreibstoff oder synthetischen Treibstoffen. 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-, Biotreibstoff- oder PtL-Bussen ähnlich gut erfüllt. Bezüglich lokal wirkender Schadstoffe sind Elektrofahrzeuge hingegen überlegen. Mit fossilen Treibstoffen betriebene Fahrzeuge erfüllen keine der Anforderungen. **Die vorliegende Studie fokussiert deshalb auf batterieelektrische Fahrzeuge⁸.** Optionen mit Brennstoffzellen

⁸ 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.

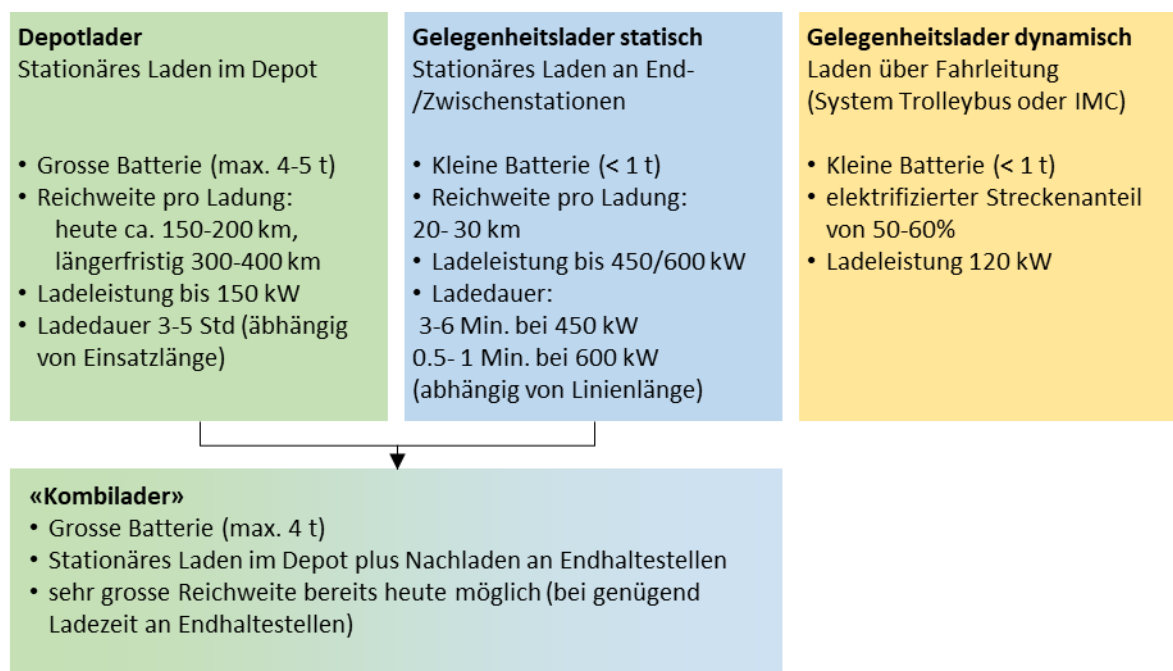
und Biotreibstoffen werden allenfalls in Fällen in Spiel gebracht, in denen mittelfristig keine realistische Möglichkeit gesehen wird, die entsprechende Dienstleistung mit batterieelektrischen Fahrzeugen anzubieten. Fossil betriebene Optionen werden in der Studie nicht betrachtet. Einzig Dieselbusse 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 ist stark abhängig von den Entwicklungen der Batterien (technischer Fortschritt, Batteriekosten) und auch von den Entwicklungen der Brennstoffzellen. Die Kostenentwicklung von Verbrennungs- und Hybridbussen sind vor allem vom Treibstoffpreise abhängig. Bezüglich Kostenentwicklung beim Dieselpreis werden Sensitivitäts- bzw. Schwellenwertbetrachtungen angestellt (siehe Kapitel 4).

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 3).

Abbildung 3: Übersicht Batteriebusstypen



Grafik: INFRAS. Bei den angegebenen Spezifikationen zu Batteriegrössen, Reichweiten, Ladeleistungen handelt es sich vorerst um grobe Richtwerte (Wissensstand 2019), 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 das Fahrzeug 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 dieser 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 einigen 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 beim Depotlader, kann der Entschieder, 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 können 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 Streckenanteile 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 vorangehender E-Bus-Studien (INFRAS 2018, INFRAS 2019). eingeführt haben.⁹

Im Folgenden stellen wir kurz jede der vier genannten Ausprägungen vor (Kapitel 3.1.2 bis 3.1.5). In Kapitel 3.1.1 gehen wir 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. Schliesslich werden in Kapitel 3.1.6 die für die verschiedenen Optionen nötigen Ladesysteme vorgestellt.

3.1.1. Eigenschaften von Batterien und Annahmen zu deren Entwicklung

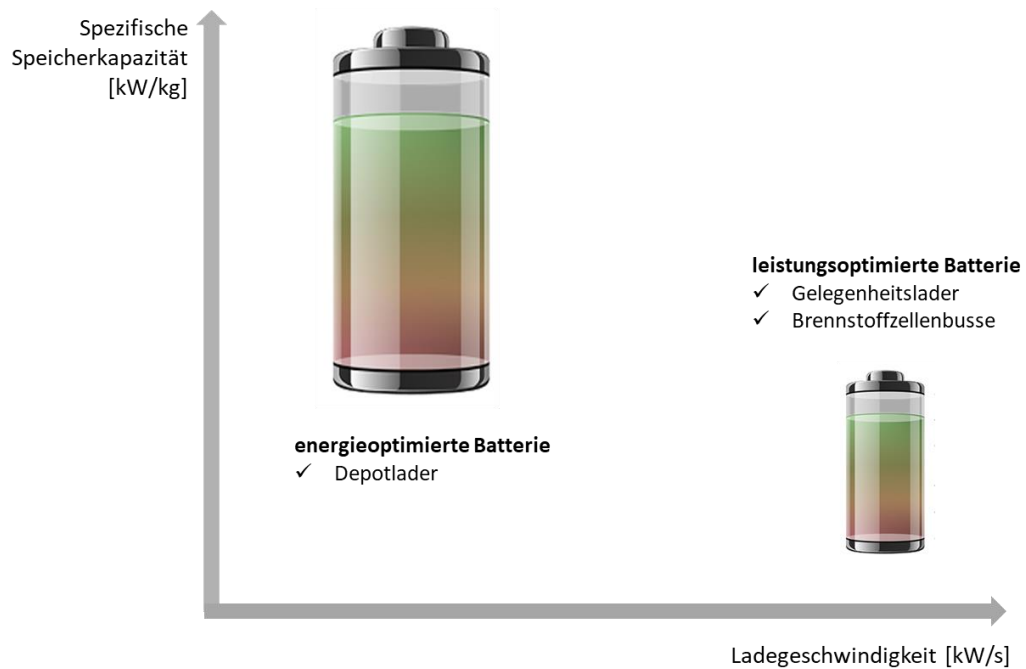
In der vorliegenden Studie umfasst der Begriff «Batterie» immer das ganze System, das sich aus den eigentlichen elektrochemischen Zellen, einem Batteriemanagementsystem, einer Kühlung und einer Verpackung und Kontaktierung zusammensetzt. In der Literatur und in Herstellerangaben werden oft die Eigenschaften 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. Abbildung 4 zeigt einen schematischen Vergleich dieser beiden Batterietypen.

Energieoptimierte Batterien sind pro Speicherkapazität deutlich günstiger als leistungsoptimierte Typen. Für beide Typen werden aber in den nächsten 20-30 Jahren grosse Fortschritte erwartet - sowohl bezüglich spezifischer Speicherkapazität (kWh/kg) als auch bezüglich spezifischer Kosten (CHF / kWh) (vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6).

⁹ Kombilader werden zurzeit auch in Pilotversuchen getestet, beispielsweise durch Bernmobil und PostAuto.

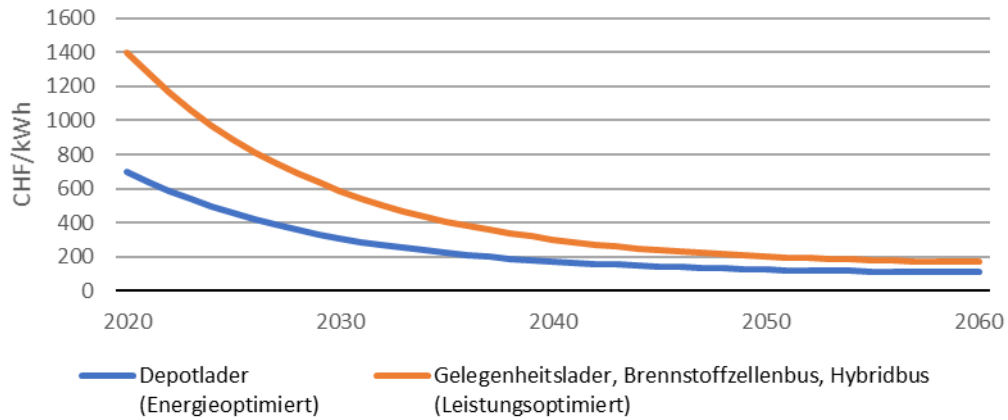
Abbildung 4: Schematischer Vergleich der energieoptimierten und der leistungsoptimierten Batterie (nicht masstäblich).



Grafik INFRAS.

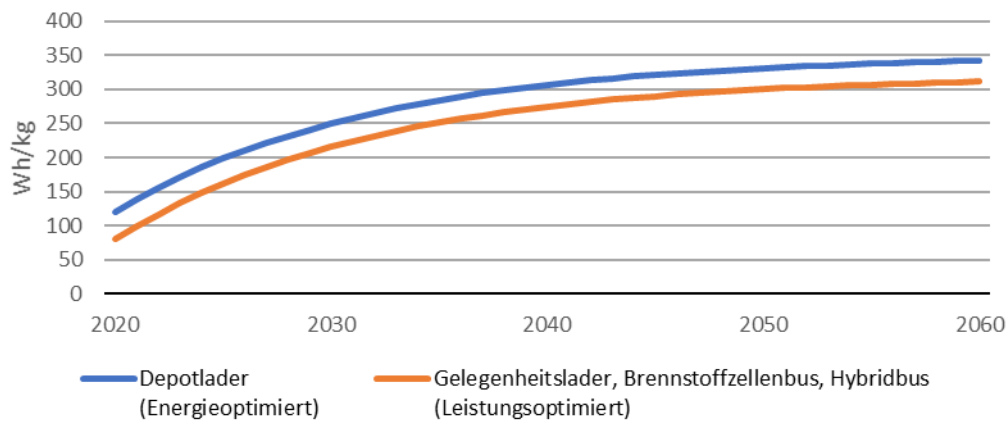
Für den eigentlichen Fahrbetrieb können nicht 100% der Energie einer geladenen Batterie genutzt werden. Um eine möglichst lange Lebensdauer der Batterie zu erreichen, darf die Batterie nicht ganz entladen werden. Ebenfalls reduziert die Alterung die Ladekapazität. Zudem verbraucht ein Elektrobus auch 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 7).

Abbildung 5: Entwicklung spezifische Batteriekosten für Elektrobusse



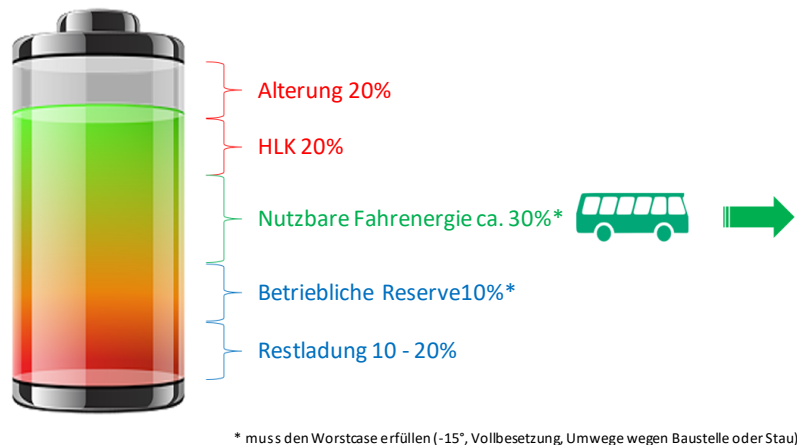
Grafik: INFRAS. Es ist zu beachten, dass Batterien für Busse deutlich teurer sind als Batterien für Elektro-Pkw. Quellenangaben und Details siehe Annex 1

Abbildung 6: 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 7: 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 zu zusätzlichem Aufwand und oft auch zu zusätzlichem Fahrzeugbedarf führt. 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, weil sich sonst die Beförderungskapazität reduziert, um die maximale Achslast einzuhalten¹⁰.

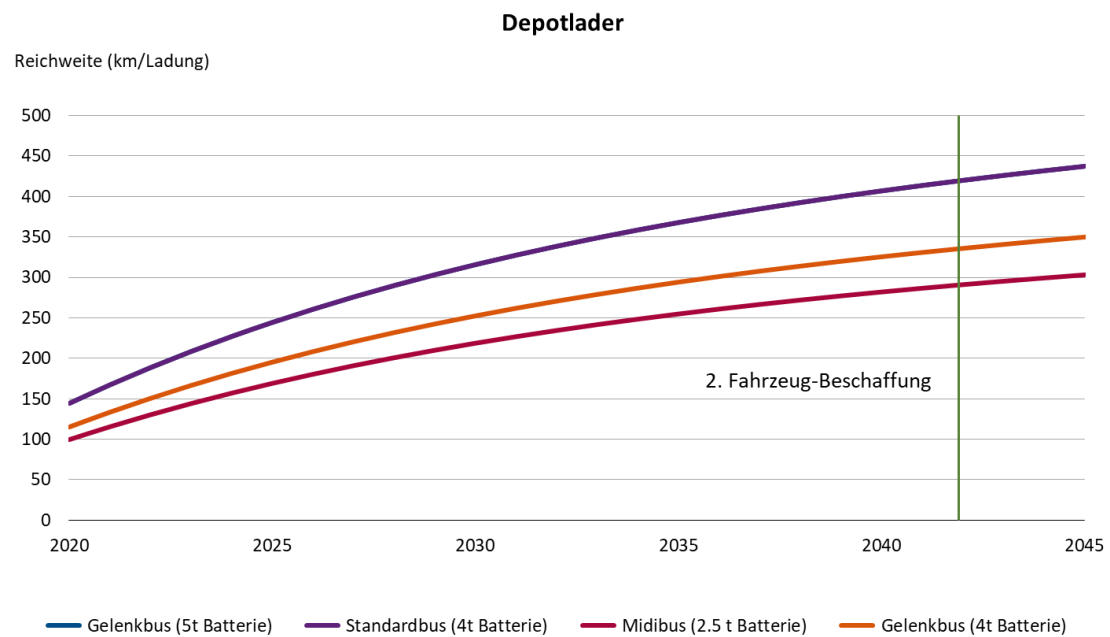
Depotlader von verschiedenen Herstellern sind seit mehreren Jahren auf dem Markt. Inzwischen haben auch die grossen Bushersteller für die nächsten Jahre serienreife Modelle angekündigt. Da Batterien (noch) sehr teuer und schwer sind, sind Depotlader heute meistens mit bis zu 600 kWh Batteriekapazität (ca. 4-5 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 2030 von einer über die Jahre konstanten Batteriemasse von 4 t aus. Aufgrund der Batterieentwicklung nimmt die Kapazität

¹⁰ Ein Depotlader Gelenkbus mit 4 t Batteriemasse hat immer noch über 8 t Kapazität für Passagier; bei einem Durchschnittsgewicht pro Passagier von 75 kg entspricht das einer Zuladung von über 100 Passagieren.

mit der Zeit zu, was bedeutet, dass ein im Jahr 2030 beschaffter Bus eine deutlich geringere Reichweite hat als ein in den Jahren 2040 oder 2050 beschaffter Bus (vgl. Abbildung 8).

Abbildung 8: Entwicklung der realen Reichweite von Depotladern



Bemerkung: Die Reichweiten des Gelenkbusses mit 5-Tonnen-Batterie und jene des Standardbusses mit 4-Tonnen-Batterie sind identisch

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, so dass 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 leistungs-optimierte) Batterien (s. Kapitel 3.1.1). In dieser Studie gehen wir von Batterien aus, die eine theoretische Reichweite von etwa 15-30 km pro Ladung erlauben. Mit steigender Batteriekapa-

zität und sinkenden Kosten über die Zeit wird ein Gelegenheitslader auf dem neusten technischen Stand im Jahr 2040 also eine leichtere und vor allem günstigere Batterie haben als der vergleichbare Bus im Jahr 2030.

Bei Gelegenheitsladern ist meist die Standzeit an den Endhaltestellen der begrenzende Faktor für einen effizienten Einsatz. Die Fahrzeuge brauchen genügend Zeit zum Nachladen der Batterie. Je nach Streckenlänge und -profil beträgt diese benötigte 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 Endhaltestellen. 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 mit jenen des statischen Gelegenheitsladers kombiniert. Kombi-Lader sind eigentlich Depotlader mit einer grossen, leistungsoptimierten 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 (IMC, Batterietrolleybus)

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 Strecke¹¹ ohne Oberleitung zu fahren. Der Anteil an Oberleitung ist stark abhängig vom Streckenprofil und der resultierenden Länge eines zusammenhängenden fahrleitungslosen Abschnitts sowie der Nachlademöglichkeit im Falle von Umleitungen oder eines Teilstreckenbetriebs. Mit dem Einsatz des Batterietrolleybusses 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 eigenen 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 meistens eine Batteriekapazität von maximal 600 kWh. In dieser Studie gehen wir davon aus, dass in Zukunft aufgrund von Verbesserungen bei der Batterie Fahrzeuge mit bis zu 1'100 kWh Batteriekapazität verfügbar sein werden. Bei einer Ladeleistung von 150 kW kann ein heutiger Depotlader in gut 4 Stunden geladen werden, während ein künftiger Bus mit 1'100 kWh Kapazität eine Ladedauer von etwa 7 Stunden benötigen würde¹². 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 benötigt, je nach Betriebskonzept auch mehr. In dieser Studie gehen wir davon aus, dass ein Depot für Depotlader über eine Anschlussleistung von 150 kW pro Ladestation verfügt. An den typischen Standorten von Busdepots in Gewerbe-/Industriegebieten ist i.d.R. eine Anschlussleistung von 5 MW 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

¹¹ Um als Trolley zugelassen zu werden, muss der Bus allerdings mehr als 50% der Strecke an der Oberleitung fahren.

¹² Da die Batterie nicht vollständig entladen wird, sind es in der Praxis weniger als die theoretischen 4 bzw. 7 Stunden. Werden beispielsweise maximal 60% Energie aus der Batterie genutzt, verkürzen sich die Ladezeiten auf rund 2.5 bzw. 4.5 Stunden.

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 und das Aufladen der Busse zu optimieren.

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 selbst eine grosse Gelegenheitslader-Flotte keine besonders hohe Anforderung an die Ladeleistung im Depot. Hingegen braucht jede Ladestation 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 erhöhen die Fahrzeugkosten.

3.1.8. Anforderungen an Depots und Werkstätten

Batteriebusse könnten aufgrund gesetzlicher Vorschriften je nach Situation bauliche Anpassungen 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 Dieselsebusse. 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 fossilem Erdgas durch Dampfreformierung 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 Wasserstoff-tankstellen typischen Anlagen liegt bei etwa 60%.

Aufgrund des energetischen Wirkungsgrads der Brennstoffzelle, der im Bereich von 60% liegt, verbraucht ein Brennstoffzellenbus beim Betrieb etwa doppelt so viel Energie als ein vergleichbarer Batteriebus. Hier wird eine kontinuierliche Verbesserung erwartet, doch wird der Energieverbrauch von Brennstoffzellenbussen trotzdem immer über dem von Batteriebussen liegen.

In der Schweiz gibt es derzeit nur einzelne Wasserstofftankstellen. Die Anschaffung von Brennstoffzellenbussen würde demnach voraussetzen, dass mindestens eine Wasserstofftankstelle in der Nähe der Busdepots 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 angekündigt bis 2025 eine Serie von 1'600 Brennstoffzellen-LKW in der Schweiz in Verkehr zu setzen.¹³ Auch haben verschiedene Bushersteller in Europa und Asien inzwischen für 2020 erste Kleinserien in Aussicht gestellt.

¹³ <https://www.news.hyundai.ch/einzigartiges-wasserstoff-okosystem-mit-grunem-wasserstoff-und-hyundai-h2-elektro-nutzfahrzeugen-startet-ab-2020-in-der-schweiz>

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 60-180 kW, was in etwa der durchschnittlich benötigten Leistung eines Normal- oder Gelenkbusses entspricht. Solche Module wiegen zwischen ca. 250 und ca. 400 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- 300'000 Euro. Ziel von Ballard ist, diese Kosten noch einmal zu halbieren.

Die Herstellung eines Brennstoffzellensystems und Wasserstofftanks für einen E-Bus verursacht Treibhausgasemissionen in der Grössenordnung der Herstellung einer Gelegenheitslader-Batterie von 400 kWh. Die Lebensdauer von Brennstoffzellen-Modulen liegt heute im Bereich von typischen Batterielebensdauern.

3.3. Bio- und synthetische Treibstoffe

Biodieselfahrzeuge unterscheiden sich technisch nur unwesentlich von herkömmlichen Dieselfahrzeugen. Die Unterschiede hängen vor allem 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 deklariertes 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 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 immer eine bestimmte Menge Biogas emittiert. Darum verursachen Biogasfahrzeuge etwas höhere THG-Emissionen als Biodieselfahrzeuge.

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 solch 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 (50-100 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 St.Gallen

Anhand folgender Fallbeispiele werden die in Kapitel 3 vorgestellten Antriebstechnologien näher betrachtet. Dabei fokussiert die E-Bus-Strategie auf Batteriebusse. D.h. für eine Auswahl an Buslinien im Kanton St.Gallen werden die Optionen Gelegenheitslader dynamisch (IMC), Gelegenheitslader statisch sowie Depotlader untersucht und mit dem Dieselbus (konventionell, Euro VI) verglichen. Für zwei Linien wird zusätzlich die Option «Brennstoffzellenbus» gerechnet.

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 längerfristig der Depotlader zweckmässiger ist, sollte kurzfristig nicht in Ladeinfrastruktur entlang der Linien investiert werden.

Bemerkung zum Dieselpreis: In der vorliegenden Studie wird für den betrachteten Zeithorizont 2030 mit einem Dieselpreis von 1.35 CHF/l gerechnet. Dieser Preis versteht sich ohne MWST und berücksichtigt nach wie vor die Treibstoffzoll-Rückerstattung für den konzessionierten Linienbetrieb (momentan 0.5859 CHF/L).

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

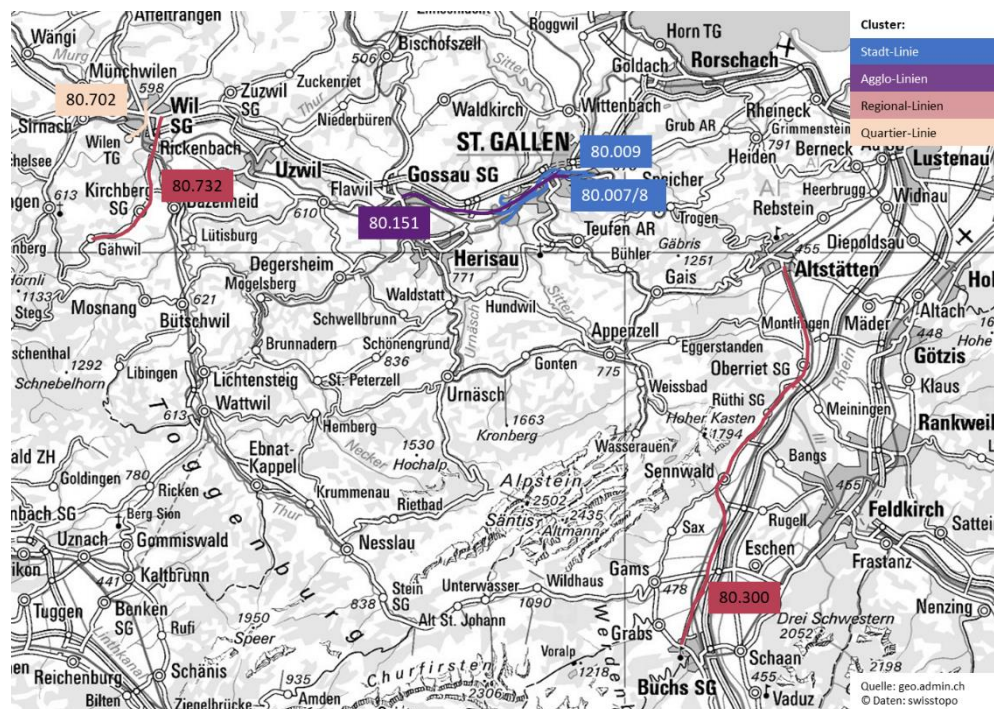
Folgende Linien werden als Fallbeispiele betrachtet (s. auch Karte in Abbildung 9):

Tabelle 1: Betrachtete Fallbeispiele

Linien-Nr.	Linienführung	Bustyp	Linienlänge (max.)	Taktintervall Mo-Fr HVZ	Anzahl Fahrzeuge im Grundangebot (ohne Reserve)
Stadt-Linien					
80.009	St.Gallen Hölzli – St.Gallen Sonne/Dierauerstr. (je nach Rchtg.)	Standardbus	9.2 km	20 Min	4 (plus 2 HVZ-Verstärker)
80.007/8	St.Gallen Neudorf – St.Gallen Hinterberg / St.Gallen Wendepplatz Stocken	Gelenkbus	11.3 km	10 Min bzw. 20 Min (Äste)	9
Agglo-Linie					
80.151	Gossau Bhf. – (Oberdorf) - St.Gallen Spisertor	Gelenkbus	12.7 km	10 Min	8
Regional-Linien					
80.732	Wil Bhf. – Gähwil Dorf	Gelenkbus	10.7 km	30 Min	2 (plus 1 HVZ-Verstärker)
80.300	Altstätten Stadt – (Oberriet) – Buchs	Standardbus	33.1 km	60 Min	4
Quartier-Linie					
80.702	Wilten Gemeindezentrum – Wil Neugruben	Midibus	5.6 km	15 Min	3

Tabelle INFRAS. Quelle: Daten von den Transportunternehmen VBSG, BOS und regiobus.

Abbildung 9: Betrachtete Fallbeispiele



Grafik INFRAS. Quelle: swisstopo

Bemerkungen:

- Die Auswahl der Fallbeispiele erfolgte gemeinsam mit den Transportunternehmen. Wichtig war, dass möglichst unterschiedliche und – innerhalb ihrer Cluster – repräsentative Linien betrachtet werden.
- 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 80.009 (Standardbus)

Spezifikationen der E-Bus-Varianten

Tabelle 2: Spezifikationen der drei E-Bus-Varianten für die Linie 80.009

		Gelegenheitslader dynamisch (IMC)	Gelegenheitslader statisch	Depotlader
Batterie	Gewicht	0.8 t	0.8 t	4 t
	Kapazität	75 kWh	75 kWh	1'000 kWh (2030) 1'253 kWh (2040)
	max. Reichweite pro Ladung	22 km	22 km	316 km (2030) 420 km (2040)
Ladeinfrastruktur	Anteil neue Oberleitung, Anzahl Ladestationen	3.5 km (+1.8 km bestehend --> 60% Oberleitung)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3 Schnellladestationen (450 kW): je 1 an den beiden Endhaltestellen und am Bhf. St.Gallen --> total 3 Stationen. ▪ 2 Ladestationen im Depot 	6 Ladestationen im Depot (à 150 kW)
	Zusätzliche Fahrzeug-Umläufe	0	1 (Mo-Sa)	0
	Zusätzliche Fahrzeuge	0	1	0
	Total Fahrzeugbedarf (ohne Reserve)	6	7	6

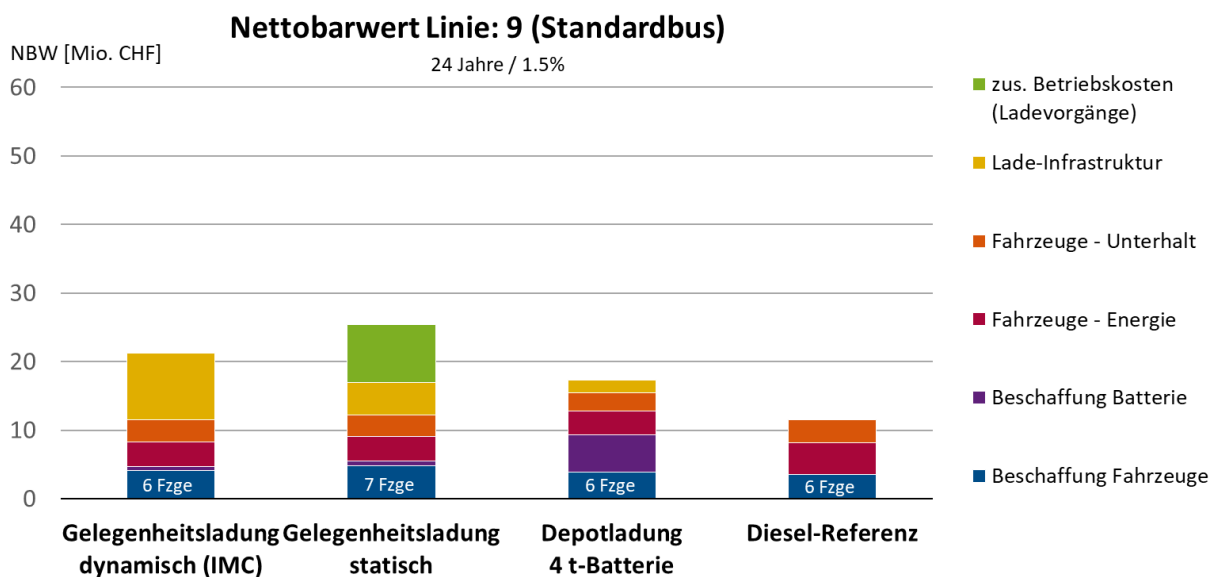
Tabelle INFRAS.

Das Regelangebot auf der Linie 9 wird heute mit vier Bussen gefahren (ohne Reserve). Dazu kommen in der HVZ zwei zusätzliche Einsatzkurse. Die Wendezeiten der Linie reichen nicht aus, um die Batterie des statischen Gelegenheitsladers genügend nachzuladen, deshalb sind für diese Variante ein zusätzlicher Umlauf mit einem zusätzlichen Fahrzeug notwendig. Die Reichweiten der Depotlader-Busse reichen im Zeithorizont 2030 aus, um alle heutigen Fahrzeugeinsätze ohne Nachladen abzudecken.

Auswirkungen auf die relevanten Kostenblöcke

Die obigen Mengengerüste werden mit den entsprechenden Kostensätzen verrechnet (s. Annahmen in Annex A2). Diese Kostenberechnungen aller drei E-Bus-Varianten sowie zum Vergleich des Dieselmotors führt zu folgenden Resultaten:

Abbildung 10: Teilkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030



Grafik INFRAS.

Am günstigsten ist für die Linie 80.009 der Depotlader. Zwar sind die Batteriekosten deutlich höher als bei den Gelegenheitsladern. Jedoch sind keine zusätzlichen Fahrzeuge notwendig, weil die Tageseinsätze nicht grösser als die Reichweiten der Standardbusse mit einer 4 Tonnenbatterie (ca. 320 km pro Ladung im Betrachtungshorizont 2030) sind.

Der IMC-Gelegenheitslader ist jedoch nicht viel teurer, weil er teilweise das bestehende Oberleitungsnetz mitbenutzen kann. Mit 3.5 km neu zu erstellender Oberleitung sind zusammen mit dem bereits elektrifizierten Streckenabschnitt Fürstenlandbrücke – Spisertor von 1.8 km insgesamt ca. 60% der Strecke mit Fahrleitungen ausgerüstet, was ausreicht, um bei dynamischer Gelegenheitsladung die Batterien auf den Bussen ausreichend zu laden. Diese Kosten der Ladeinfrastruktur machen beim Batterietrolleybus den grössten Anteil aus und führen dazu, dass der IMC- oder Batterietrolleybus für die Linie 9 teurer ist als der Depotlader.

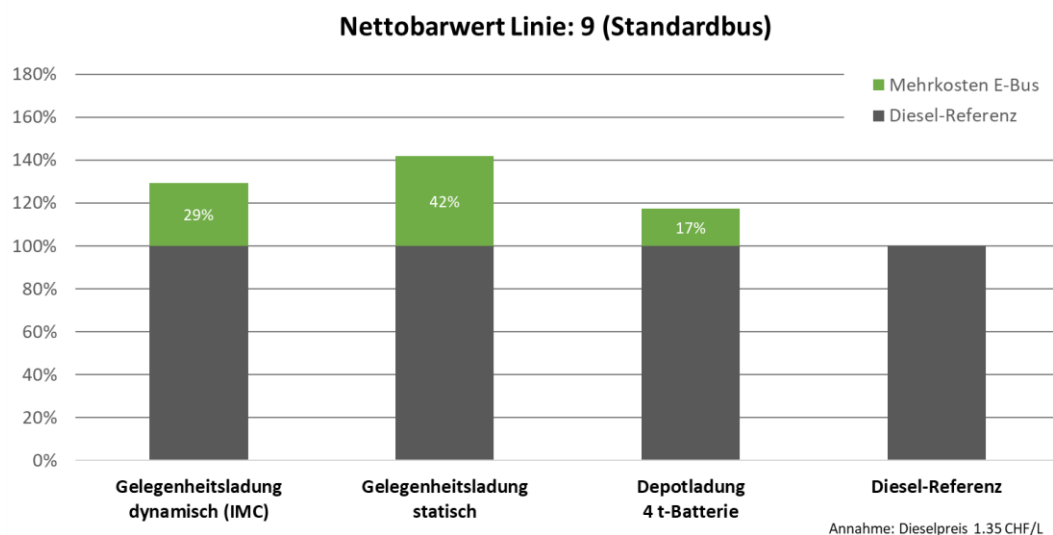
Die Kosten des statischen Gelegenheitsladers sind am höchsten: weil die Wendezeiten in den meisten Fällen zu knapp sind, um die Batterien genügend nachzuladen, braucht es einen zusätzlichen Umlauf inkl. einem zusätzlichen Fahrzeug. Entsprechend schlagen die zusätzlichen

Betriebskosten beim statischen Gelegenheitslader am meisten zu Buche. Die Unterhalts- und Energiekosten sind bei allen drei E-Bus-Varianten gleich hoch.

Mehrkosten gegenüber Diesel

Die in Abbildung 10 dargestellten Kostenübersichten sind jedoch nicht vollständig. Jene Kosten, die bei allen Busvarianten identisch sind, wurden dort nicht mitberechnet (Fahrpersonal, allgemeiner Overhead etc.). Werden alle diese Positionen in die Kostenrechnung einbezogen, sind die relativen Unterschiede zwischen den drei E-Bus-Varianten und insbesondere zwischen den E-Bussen und dem Dieselbus kleiner (Abbildung 11). Dabei wird angenommen, dass beim Dieselbus die in Abbildung 10 betrachteten Teilkosten ca. 30-35% der Vollkosten ausmachen. In der Vollkostenrechnung ist der Depotlader somit 17% teurer als der Dieselbusbetrieb (bei einem für den Zeithorizont 2030 angenommenen Dieselpreis für konzessionierten Betrieb von 1.35 CHF/Liter). Der Batterietrolleybus und Gelegenheitslader führen zu knapp 30 % bzw. 42% Mehrkosten. Bei einem Dieselpreis von 3.50 CHF/l wären Dieselbus und E-Busse mit Depotladung ungefähr gleich teuer.

Abbildung 11: Vollkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030



Annahme: die betrachteten Teilkosten machen beim Dieselbus ca. 30% der Vollkosten aus.

Grafik INFRAS.

Ökologische Auswirkungen

Alle drei E-Bus-Varianten haben im Vergleich zum Dieselbus deutliche ökologische Vorteile. Der Primärenergieverbrauch kann mit den E-Bussen um 20% bis 30% gesenkt werden. Die Treib-

hausgasemissionen lassen sich um 70% bis 85% reduzieren. Der Betrieb erfolgt bei den Elektrobusen praktisch emissionsfrei. Von den drei E-Bussen schneidet der Depotlader aufgrund der grösseren Batterie am schlechtesten ab.

Abbildung 12: Primärenergieverbrauch der drei E-Bus-Varianten und des Dieselbusses (inkl. Reduktion ggü. dem Dieselbus in %)

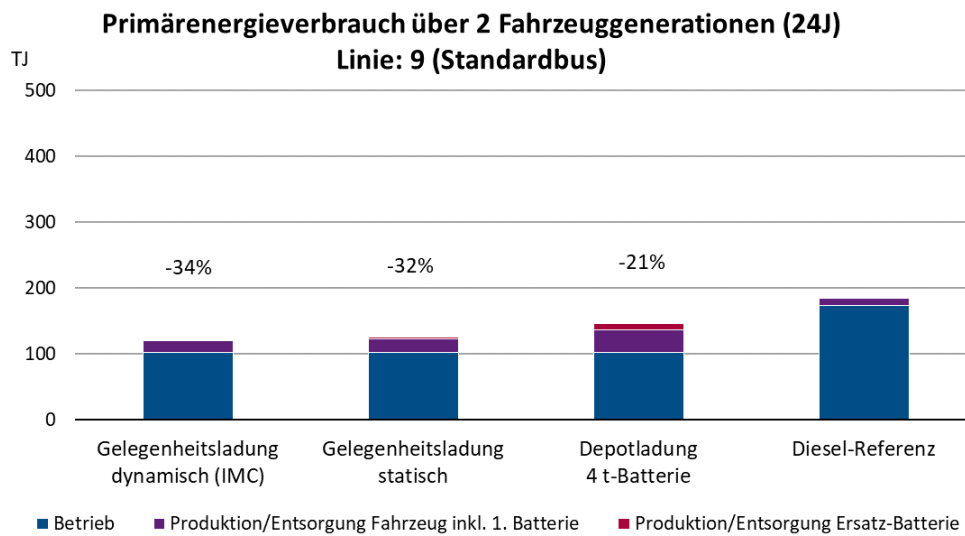
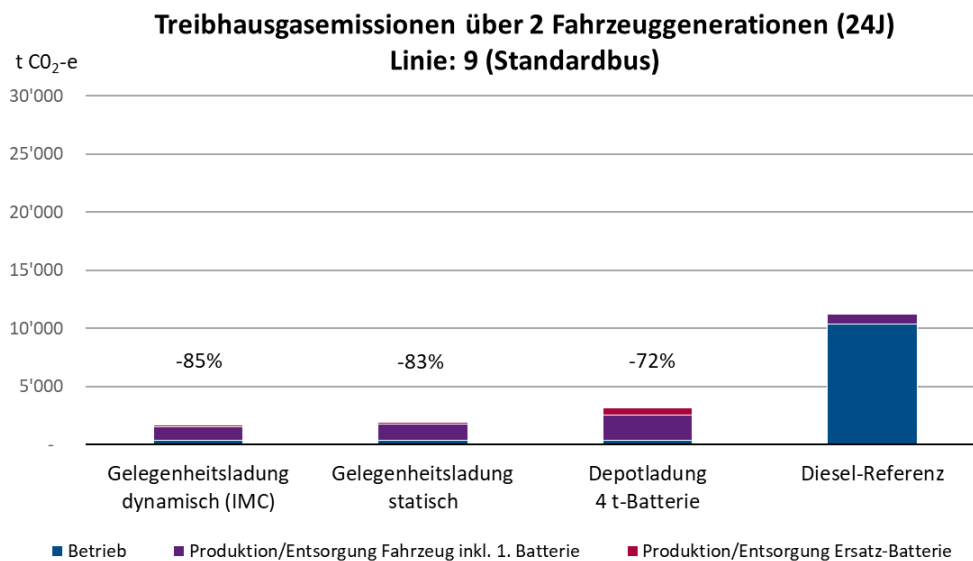


Abbildung 13: Treibhausgasemissionen der drei E-Bus-Varianten und des Dieselbusses (inkl. Reduktion ggü dem Dieselbus in %)



Bemerkung: Bei den Elektrobusen stammen die THG-Emissionen des Betriebs aus der Stromherstellung.
Grafik INFRAS.

4.1.2. Stadt-Linie 80.007/8 (Gelenkbus)

Spezifikationen der E-Bus-Varianten

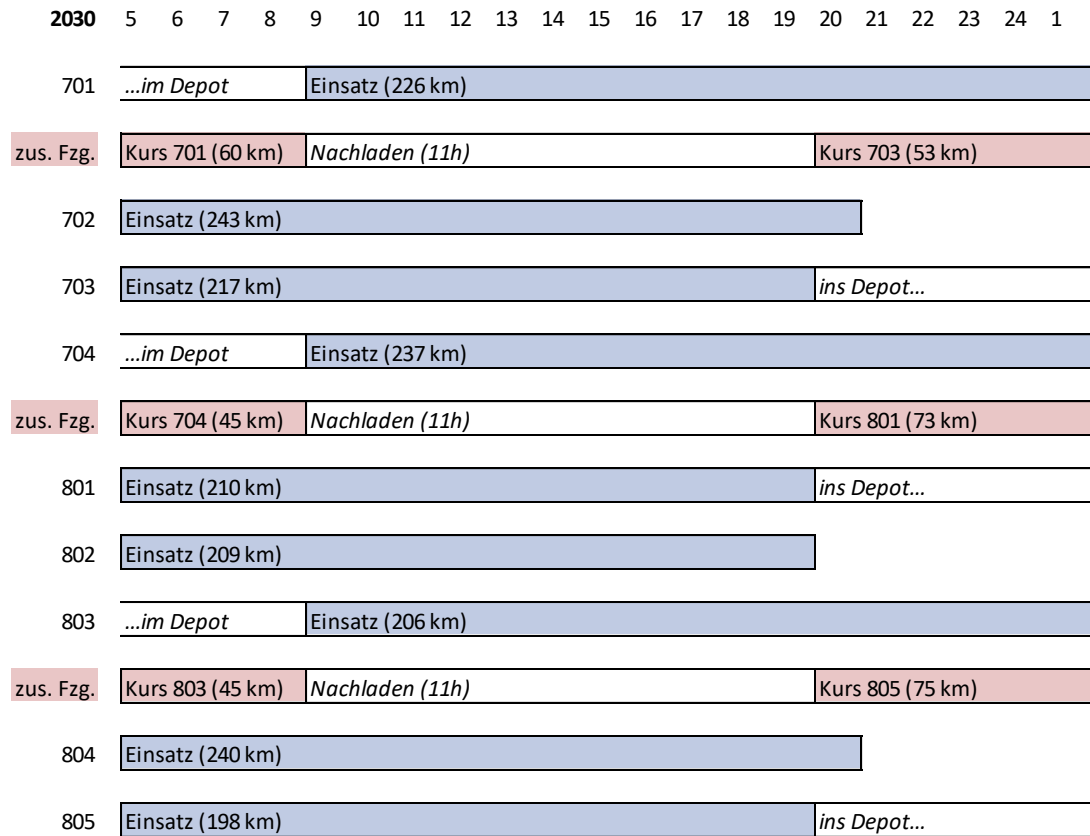
Tabelle 3: Spezifikationen der E-Bus-Varianten für die Linie 80.007/008

		Gelegenheitslader dynamisch (IMC)	Gelegenheitslader statisch	Depotlader	Brennstoffzelle
Batterie	Gewicht	0.8 t	1.1 t	4 t	Zelle: 385 kg H2-Tank: 1 t
	Kapazität	75 kWh	100 kWh	1'000 kWh (2030) 1'253 kWh (2040)	2.28 MWh Energiespei- cherung (H2-Tank), 180 kW Leistung (Zelle9)
	max. Reichweite pro Ladung	18 km	24 km	252 km (2030) 336 km (2040)	
Ladeinfrastruk- tur	Anteil neue Oberlei- tung, Anzahl Ladestationen	3.5 km (+3.2 km bestehend --> 60% Oberleitung)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3 Schnellladesta- tionen (450 kW): je 1 an allen drei Endhaltestellen ▪ 3 Ladestationen im Depot 	11 Ladestationen im Depot (à 150 kW)	1 Wasserstofftankstelle
	Zusätzliche Fahrzeug-Um- läufe	0	1 (Mo-So)	0	0
	Zusätzliche Fahrzeuge	0	1	3 (2030) 0 (2042)	0
	Total Fahrzeugbedarf (ohne Reserve)	9	10	12	9

Tabelle INFRAS.

Das Regelangebot auf der Linie 7/8 wird heute mit neun Bussen gefahren (ohne Reserve). Die Reichweiten der Depotlader-Busse reichen im Zeithorizont 2030 nicht aus, um alle heutigen Fahrzeugeinsätze ohne Nachladen abzudecken. Durch ein optimiertes Einsatzkonzept für die Depotlader-Busse kann die Anzahl zusätzlich notwendiger Fahrzeuge auf drei Busse minimiert werden. Folgende Abbildung 14 zeigt das Einsatzkonzept für die Linie 80.007/8. Die Umläufe der acht regulären Kurse, in blau dargestellt, werden ergänzt durch drei zusätzliche Fahrzeuge (rot dargestellt).

Abbildung 14: Fahrzeugeinsatzkonzept für die Depotlader-Variante der Linie 80.007/008

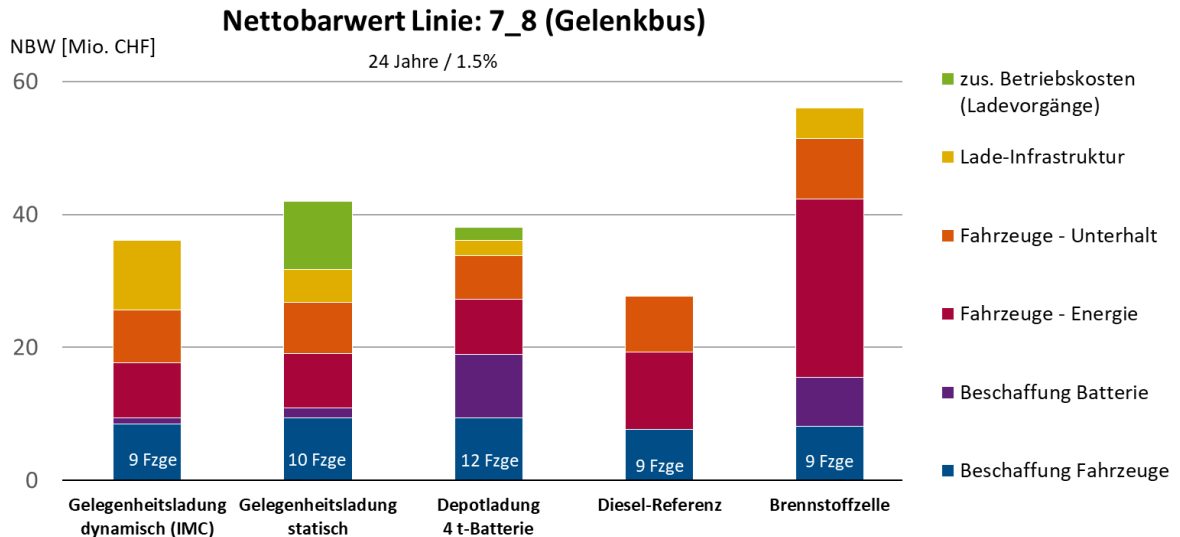


Grafik INFRAS.

Auswirkungen auf die relevanten Kostenblöcke

Die obigen Mengengerüste werden mit den entsprechenden Kostensätzen verrechnet (s. Annahmen in Annex A2). Diese Kostenberechnungen aller drei E-Bus-Varianten sowie dem Brennstoffzellenbus und zum Vergleich des Dieselmotors führt zu folgenden Resultaten:

Abbildung 15: Teilkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030



Bemerkung: Der Kostenblock «Beschaffung Batterie» umfasst beim Brennstoffzellen-Bus die Batterie, den Wasserstofftank und die Brennstoffzelle - der Kostenblock «Lade-Infrastruktur» umfasst die Wasserstoff-Tankstelle.

Grafik INFRAS.

Am günstigsten ist für die Linien 80.007/008 der dynamische Gelegenheitslader (Batterietrolleybus): seine Batterie ist verhältnismässig klein und günstig. Weil bereits 3.2 km der Strecke mit Fahrleitungen ausgerüstet sind, müssen lediglich ca. 3.5 km Oberleitung neu erstellt werden, um die Batterien auf den Bussen ausreichend zu laden. Mit den insgesamt 6.7 km Oberleitung wären rund 60% der Strecke elektrifiziert, was eine zuverlässige Versorgung der Batterien gewährleistet.

Der Depotlader ist leicht teurer als der dynamische Gelegenheitslader (Batterietrolleybus). Er benötigt zwar eine weniger kostenaufwändige Ladeinfrastruktur, dafür fallen die grossen Batterien sowie die aufgrund noch ungenügender Reichweiten im Horizont 2030 zusätzlichen zwei Busse stark ins Gewicht.

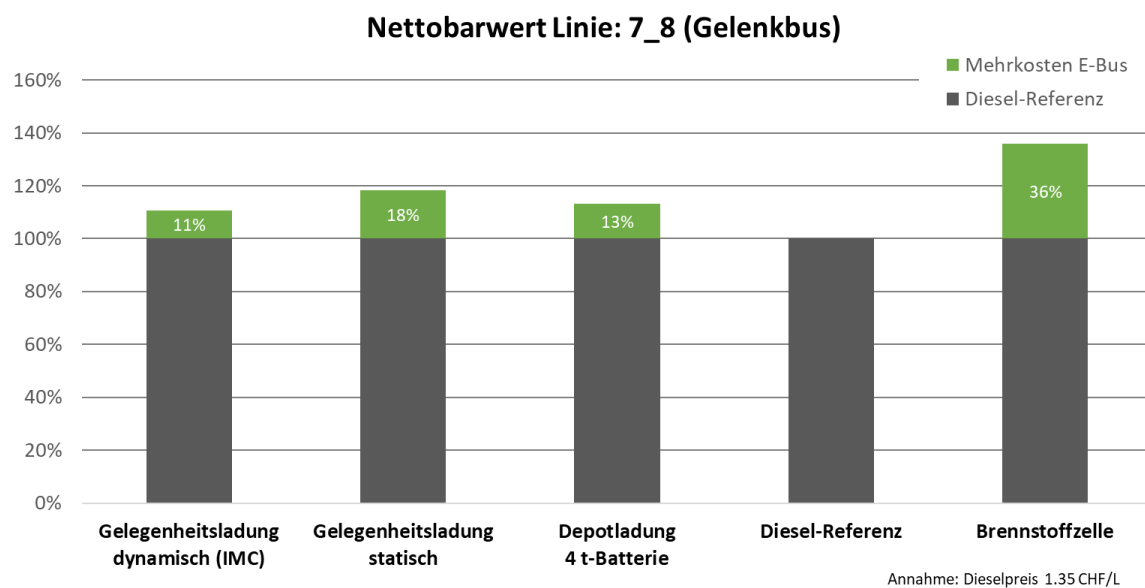
Die Kosten des statischen Gelegenheitsladers sind noch etwas höher als beim Depotlader. Zwar benötigt der Gelegenheitslader nur ein zusätzliches Fahrzeug – jedoch wirken die Fahrpersonalkosten des zusätzlichen Fahrzeugumlaufs stark kostentreibend.

Die Kosten des Brennstoffzellenbusses sind viel höher im Vergleich mit den restlichen E-Bussen. Vor allem die Energiekosten fallen deutlich stärker ins Gewicht verglichen mit den anderen drei E-Bus-Varianten.

Mehrkosten gegenüber Diesel

E-Busse auf der Linie 80.007/008 sind bezüglich Linienvollkosten 11% - 18% teurer gegenüber dem Dieselbus (bei Dieselpreis für konzessionierten Betrieb von 1.35 CHF/l). Bei einem Dieselpreis von 2.80 bis 3.00 CHF/l wären Dieselbus und E-Busse ungefähr gleich teuer. Der Einsatz von Brennstoffzellenbussen kostet über ein Drittel mehr.

Abbildung 16: Vollkostenrechnung und Vergleich mit dem Dieselbus



Annahme: die betrachteten Teilkosten machen beim Dieselbus ca. 35% der Vollkosten aus.
Grafik INFRAS.

Ökologische Auswirkungen

Alle drei E-Bus-Varianten haben im Vergleich zum Dieselbus deutliche ökologische Vorteile. Der Primärenergieverbrauch kann mit den E-Bussen um 30% bis 40% gesenkt werden. Die Treibhausgasemissionen lassen sich um 75% bis 85% reduzieren. Der Brennstoffzellenbus hingegen benötigt rund 30% mehr Primärenergie, spart jedoch ähnlich viele Treibhausgasemissionen wie der Depotlader. Insbesondere der Betrieb erfolgt bei den Elektrobussen praktisch emissionsfrei. Von den drei E-Bussen schneidet der Depotlader aufgrund der grösseren Batterie am schlechtesten ab.

Abbildung 17: Primärenergieverbrauch der vier E-Bus-Varianten und des Dieselbusses (inkl. Reduktion ggü dem Dieselbus in %)

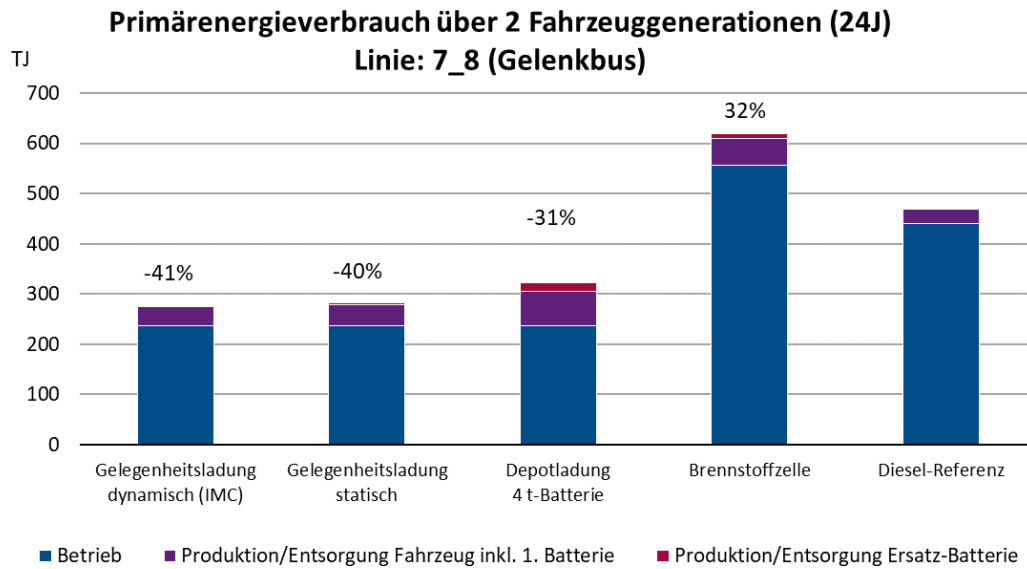
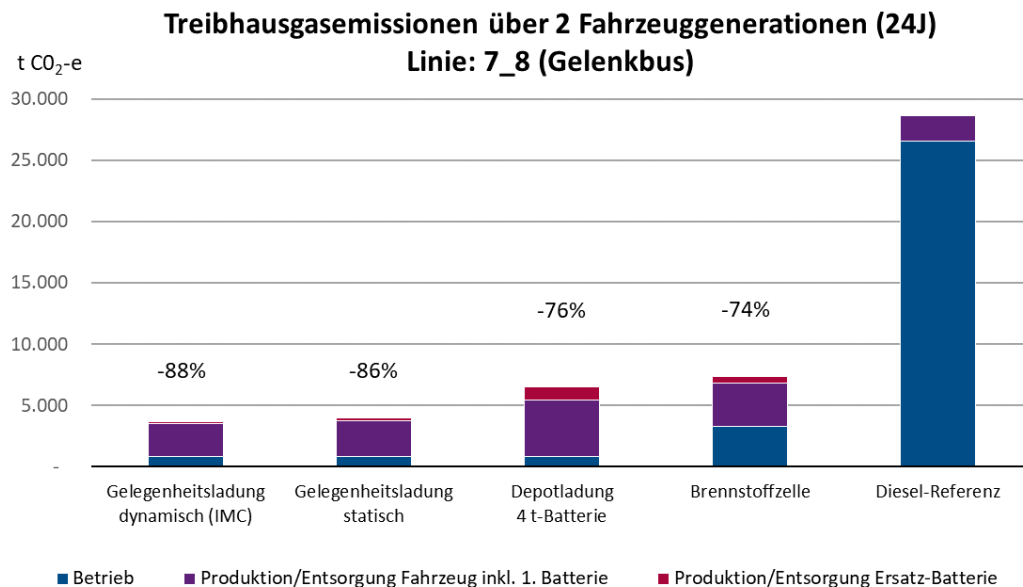


Abbildung 18: Treibhausgasemissionen der vier E-Bus-Varianten und des Dieselbusses (inkl. Veränderung ggü dem Dieselbus in %)



Bemerkung: Bei den Elektrobussen stammen die THG-Emissionen des Betriebs aus der Stromherstellung. Grafik INFRAS.

4.1.3. Agglo-Linie 80.151 (Gelenkbus)

Spezifikationen der E-Bus-Varianten

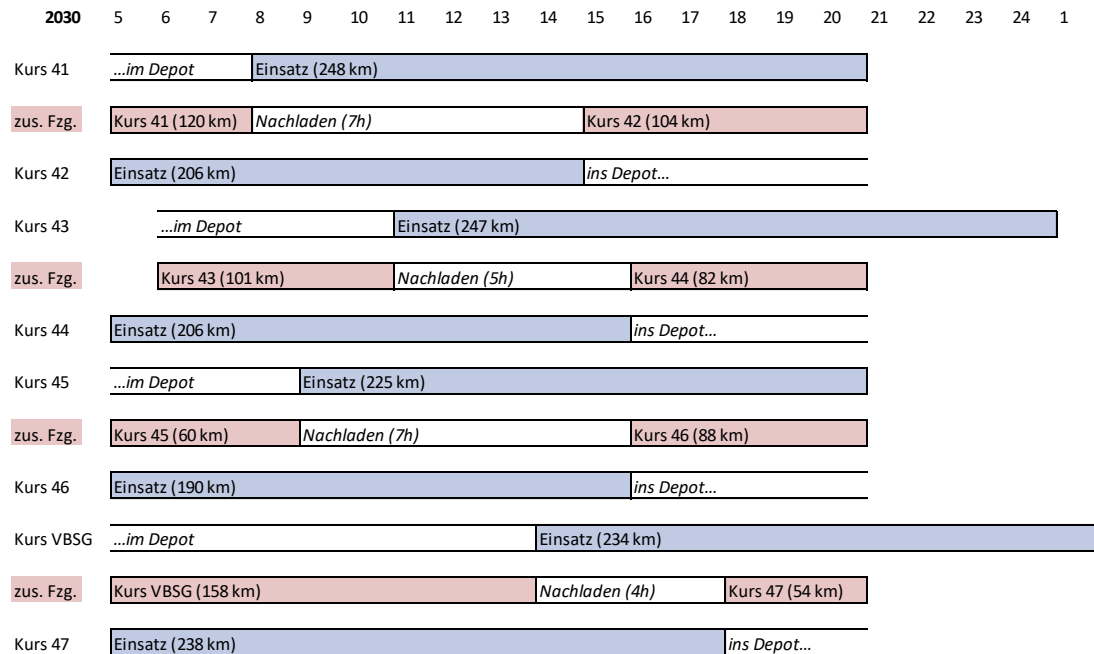
Tabelle 4: Spezifikationen der E-Bus-Varianten für die Linie 80.151

		Gelegenheitslader dynamisch (IMC)	Gelegenheitslader statisch	Depotlader	Brennstoffzelle
Batterie	Gewicht	0.8 t	1.3 t	4 t	Zelle: 385 kg H2-Tank: 1 t
	Kapazität	75 kWh	120 kWh	1'000 kWh (2030) 1'253 kWh (2040)	2.28 MWh Energie- speicherung (H2- Tank), 180 kW Lei- stung (Zelle9)
	max. Reichweite pro Ladung	16 km	29 km	252 km (2030) 336 km (2040)	
Ladeinfrastruktur	Anteil neue Oberlei- tung, Anzahl Ladestatio- nen	3 km (4.6 km be- stehend --> 60% Oberleitung)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 3 Schnellladestatio- nen (450 kW): je 1 an den beiden End- haltstellen und am Bhf. St.Gallen --> to- tal 3 Stationen. ▪ 4 Ladestationen im Depot 	11 Ladestationen im Depot (à 150 kW)	1 Wasserstofftank- stelle
	Zusätzliche Fahrzeug- Umläufe	0	1 (Mo-So)	0	0
	Zusätzliche Fahrzeuge	0	1	4 (2030) 1 (2042)	0
	Total Fahrzeugbedarf (ohne Reserve)	8	9	12	8

Tabelle INFRAS.

Das Regelangebot auf der Linie 151 wird heute mit acht Bussen gefahren (ohne Reserve). Die Reichweiten der Depotlader-Busse reichen im Zeithorizont 2030 nicht aus, um alle heutigen Fahrzeugeinsätze ohne Nachladen abzudecken. Durch ein optimiertes Einsatzkonzept für die Depotlader-Busse kann die Anzahl zusätzlich notwendiger Fahrzeuge minimiert werden. Folgende Abbildung 19 zeigt das Einsatzkonzept für die Linie 80.151. Die Umläufe der acht regulären Kurse, in blau dargestellt, werden ergänzt durch vier zusätzliche Fahrzeuge (rot dargestellt).

Abbildung 19: Fahrzeugeinsatzkonzept für die Depotlader-Variante der Linie 80.151

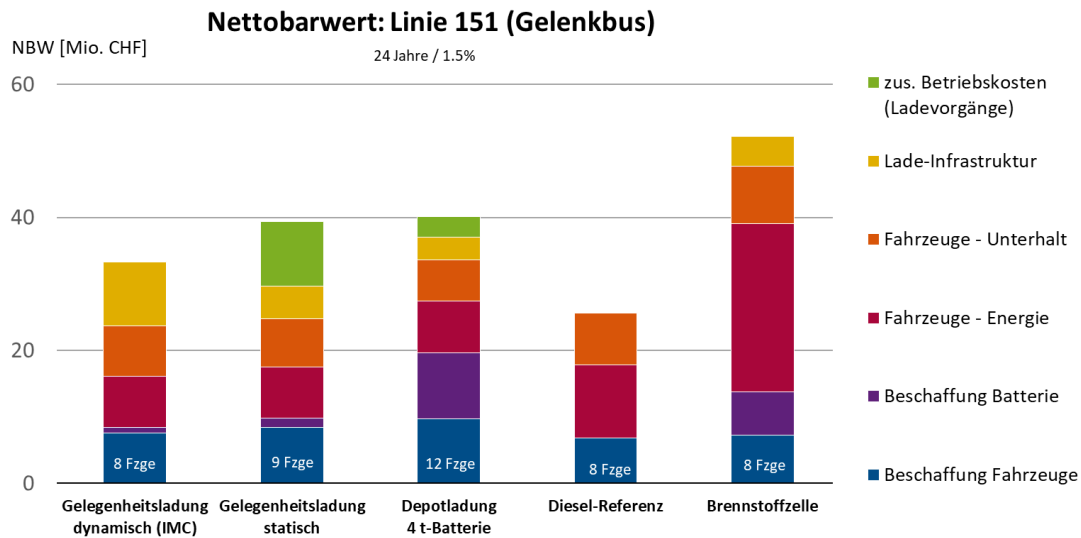


Grafik INFRAS.

Auswirkungen auf die relevanten Kostenblöcke

Die obigen Mengengerüste werden mit den entsprechenden Kostensätzen verrechnet (s. Annahmen in Annex A2). Diese Kostenberechnungen aller vier E-Bus-Varianten sowie zum Vergleich des Dieselmotors führt zu folgenden Resultaten:

Abbildung 20: Teilkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030



Bemerkung: Der Kostenblock «Beschaffung Batterie» umfasst beim Brennstoffzellen-Bus die Batterie, den Wasserstofftank und die Brennstoffzelle - der Kostenblock «Lade-Infrastruktur» umfasst die Wasserstoff-Tankstelle.

Grafik INFRAS.

Am günstigsten ist für die Linie 80.151 der dynamische Gelegenheitslader (Batterietrolleybus): seine Batterie ist verhältnismässig klein und günstig. Weil bereits rund 35% (bzw. 4.6 km) der Gesamtstrecke mit Fahrleitungen ausgerüstet sind, müssen lediglich 3 km Oberleitung neu erstellt werden, um die Batterien auf den Bussen im Fahren ausreichend zu laden. Mit den insgesamt 7.6 km Oberleitung wären 60% der Strecke elektrifiziert, was eine zuverlässige Versorgung der Batterien gewährleistet.

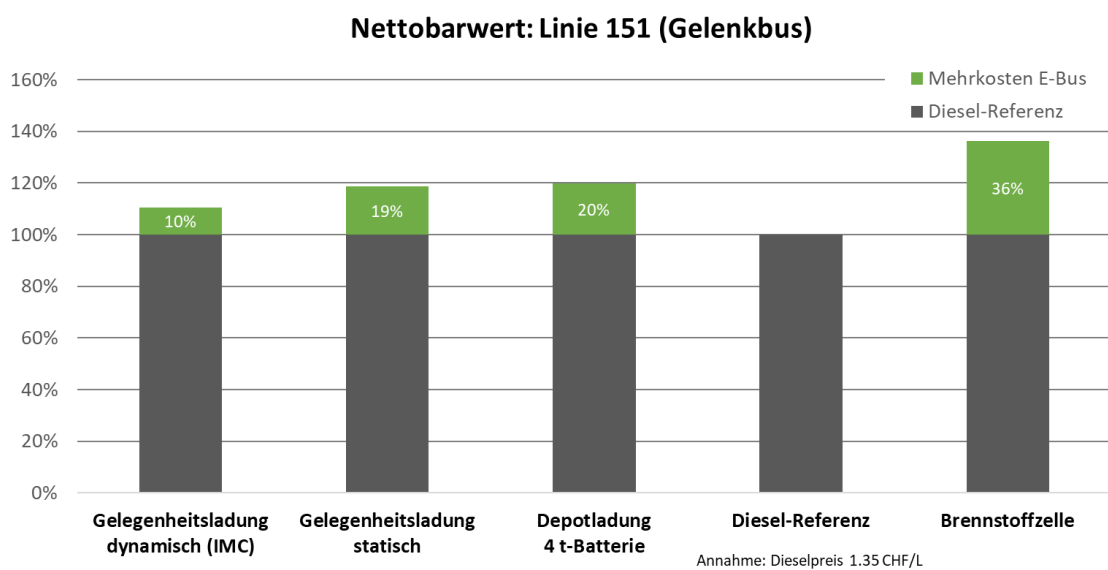
Die Kosten des statischen Gelegenheitsladers und des Depotladers sind ähnlich hoch: der Gelegenheitslader benötigt nur ein zusätzliches Fahrzeug – jedoch wirken die Fahrpersonalkosten des zusätzlichen Fahrzeugumlaufs stark kostentreibend. Beim Depotlader fällt die grosse Batterie stark ins Gewicht. Zudem sind aufgrund noch ungenügender Reichweiten im Horizont 2030 vier zusätzliche Depotlader-Busse notwendig (2042 nur noch ein zusätzlicher Bus).

Die Kosten des Brennstoffzellenbusses sind viel höher im Vergleich mit den restlichen E-Bussen. Vor allem die Energiekosten fallen deutlich stärker ins Gewicht verglichen mit den anderen drei E-Bus-Varianten

Mehrkosten gegenüber Diesel

E-Busse auf der Linie 80.151 sind bezüglich Linienvollkosten rund 10% - 20% teurer gegenüber dem Dieselbus (bei Dieselpreis für konzessionierten Betrieb von 1.35 CHF/l). Bei einem Dieselpreis von ca. 2.80 CHF/l wären Dieselbus und E-Busse ungefähr gleich teuer. Der Einsatz von Brennstoffzellenbussen kostet über einen Drittel mehr.

Abbildung 21: Vollkostenrechnung und Vergleich mit dem Dieselbus



Annahme: die betrachteten Teilkosten machen beim Dieselbus ca. 35% der Vollkosten aus.

Grafik INFRAS.

Ökologische Auswirkungen

Alle E-Bus-Varianten haben im Vergleich zum Dieselbus deutliche ökologische Vorteile: Der Primärenergieverbrauch kann mit den E-Bussen um bis zu 40% gesenkt werden. Die Treibhausgasemissionen lassen sich um 80% bis 90% reduzieren. Der Brennstoffzellenbus hingegen benötigt rund 30% mehr Primärenergie, spart jedoch ähnlich viele Treibhausgasemissionen wie der Depotlader. Der Betrieb erfolgt bei den Elektrobussen praktisch emissionsfrei. Von den drei E-Bussen schneidet der Depotlader aufgrund der grösseren Batterie am schlechtesten ab.

Abbildung 22: Primärenergieverbrauch der drei E-Bus-Varianten und des Dieselbusses (inkl. Verhältnis zum Dieselbus in %)

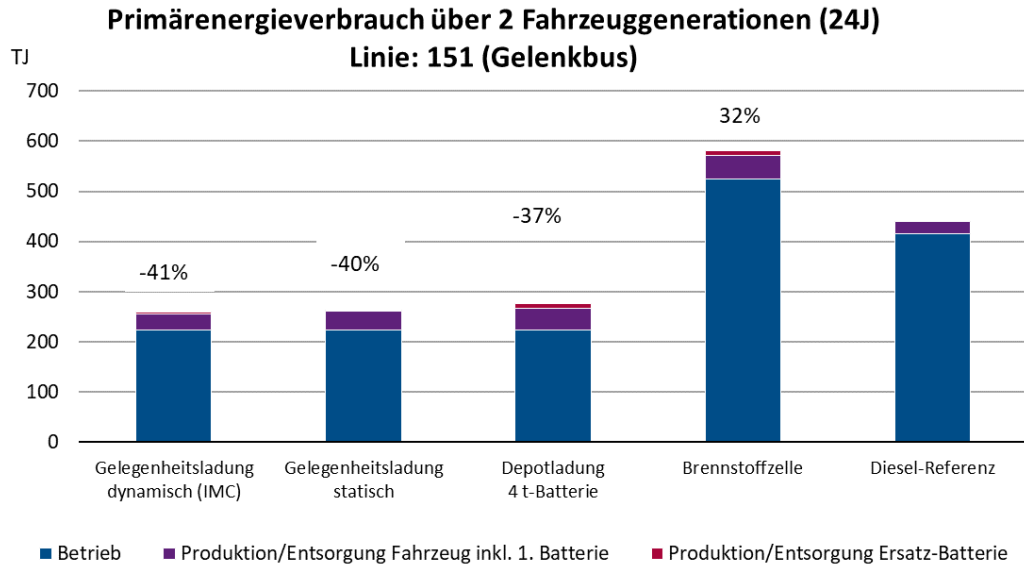
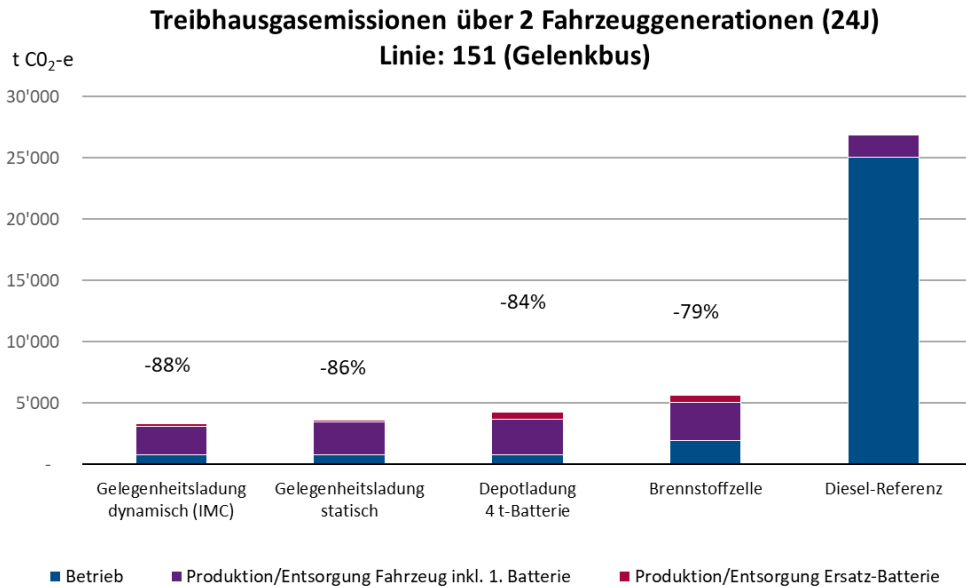


Abbildung 23: Treibhausgasemissionen der drei E-Bus-Varianten und des Dieselbusses (inkl. Verhältnis zum Dieselbus in %)



Bemerkung: Bei den Elektrobussen stammen die THG-Emissionen des Betriebs aus der Stromherstellung. Grafik INFRAS.

4.1.4. Regional-Linie 80.732 (Gelenkbus)

Spezifikationen der E-Bus-Varianten

Tabelle 5: Spezifikationen der E-Bus-Varianten für die Linie 80.732

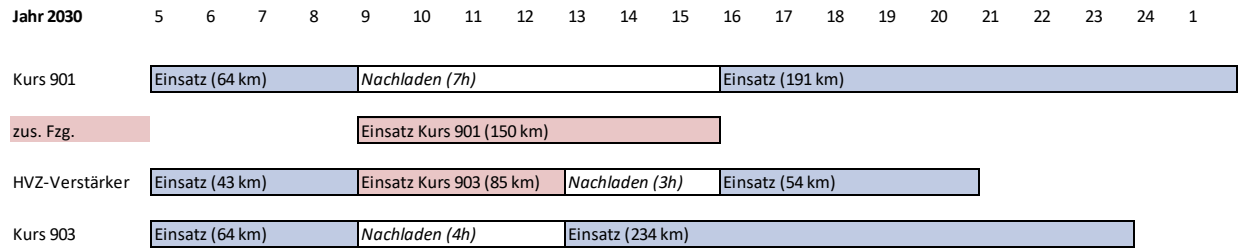
		Gelegenheitslader statisch	Kombilader	Depotlader
Batterie	Gewicht	1.3 t	1.8 t	4 t
	Kapazität	120 kWh	388 kWh (2030) 494 kWh (2040)	1'000 kWh (2030) 1'253 kWh (2040)
	max. Reichweite pro Ladung	29 km	98 km (2030) 131 km (2030)	252 km (2030) 336 km (2040)
Ladeinfrastruktur	Anteil neue Oberleitung, Anzahl Ladestationen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 Schnellladestationen (450 kW): je 1 an den beiden Endhaltestellen (Bahnhof Wil und Gähwil). ▪ 2 Ladestationen im Depot 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 Schnellladestation (450 kW) auf der Linie 4 ▪ 2 Ladestationen im Depot 	4 Ladestationen im Depot (à 150 kW)
	Zusätzliche Fahrzeug-Umläufe	1 (Mo-Fr)	0	0
	Zusätzliche Fahrzeuge	1	0	1 (2030 und 2042)
	Total Fahrzeugbedarf (ohne Reserve)	4	3	4

Tabelle INFRAS.

Für die Linie 732 wird auch der sog. «Kombilader» betrachtet. Mit einer 1.8-Tonnen-Depotladerbatterie mit knapp 400 kWh (im Horizont 2030) kann die Linie ohne zusätzlichen Fahrzeugbedarf gefahren werden. Es braucht zudem lediglich eine Schnellladestation auf der Linie. Die Batteriegrösse ist so dimensioniert, dass in den Hauptverkehrszeiten mit sehr kurzen Wendezeiten mehrere Umläufe ohne Nachladen gefahren werden können. In der Nebenverkehrszeit mit längeren Wendezeiten kann dann die Batterie wieder sukzessive nachgeladen werden.

Das Regelangebot auf der Linie 732 wird heute mit drei Bussen gefahren (ohne Reserve). Die Reichweiten der Depotlader-Busse reichen im Zeithorizont 2030 nicht aus, um alle heutigen Fahrzeugeinsätze ohne Nachladen abzudecken. Durch ein optimiertes Einsatzkonzept für die Depotlader-Busse kann die Anzahl zusätzlich notwendiger Fahrzeuge auf eines minimiert werden. Folgende Abbildung 24 zeigt das Einsatzkonzept für die Linie 80.732. Die Umläufe der regulären Kurse, in blau dargestellt, wird ergänzt durch ein zusätzliches Fahrzeug (rot dargestellt).

Abbildung 24: Fahrzeugeinsatzkonzept für die Depotlader-Variante der Linie 80.732

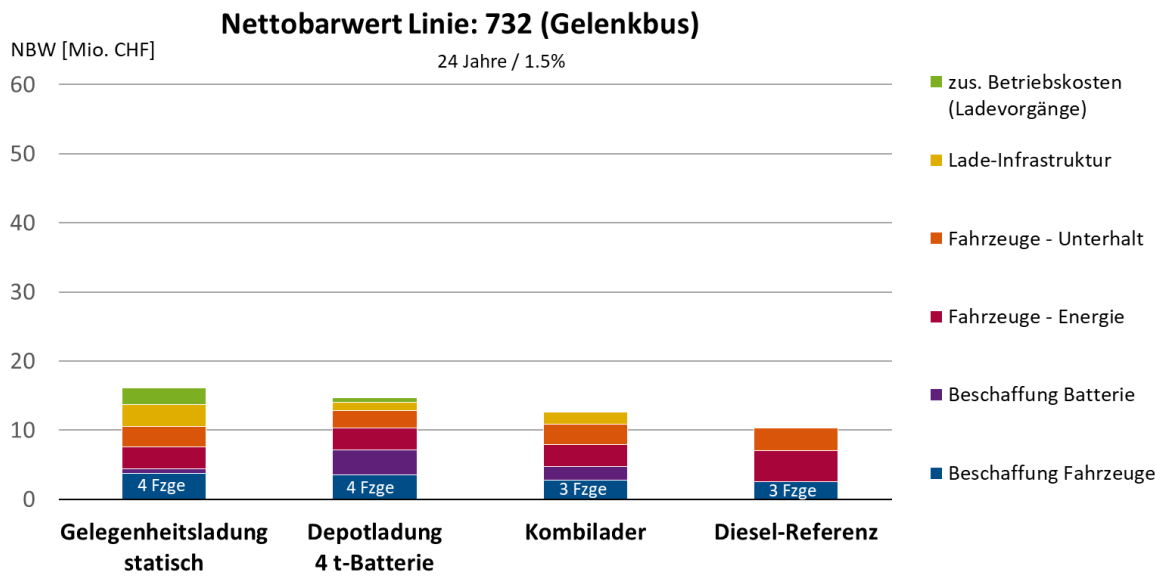


Grafik INFRAS.

Auswirkungen auf die relevanten Kostenblöcke

Die obigen Mengengerüste werden mit den entsprechenden Kostensätzen verrechnet (s. Annahmen in Annex A2). Diese Kostenberechnungen aller drei E-Bus-Varianten sowie zum Vergleich des Diesebusses führt zu folgenden Resultaten:

Abbildung 25: Teilkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030



Grafik INFRAS.

Am günstigsten ist für die Linie 80.732 der Kombilader: seine Batterie ist kleiner als jene des Depotladers – kann aber in der Nebenverkehrszeit am Linienende trotzdem genügend geladen werden, damit kein zusätzliches Fahrzeug notwendig ist. In der Hauptverkehrszeit ermöglicht die grössere Batterie mehrere Umläufe ohne nachzuladen.

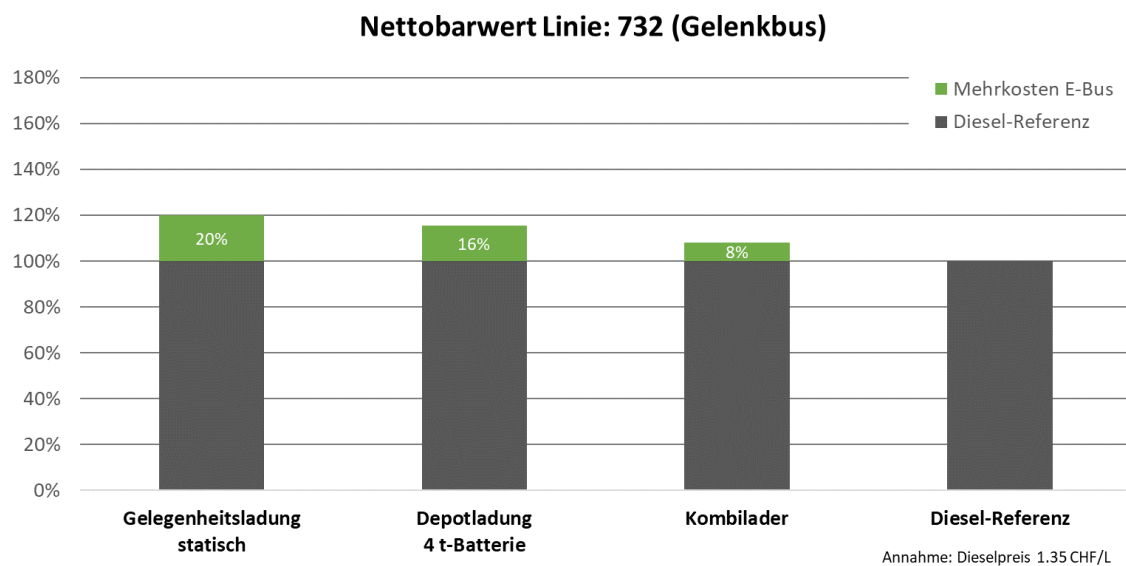
Die Kosten des statischen Gelegenheitsladers und des Depotladers sind nahe beisammen und für beide ist je ein zusätzliches Fahrzeug nötig. Der Depotlader schneidet leicht besser ab, weil beim Gelegenheitslader statisch die zusätzlichen Betriebskosten aufgrund des zusätzlichen Umlaufs die Kosten erhöhen.

Die Unterhalts- und Energiekosten sind bei allen drei E-Bus-Varianten gleich hoch.

Mehrkosten gegenüber Diesel

E-Busse auf der Linie 80.732 sind bezüglich Linienvollkosten rund 10% - 20% teurer gegenüber dem Dieselbus (bei Dieselpreis für konzessionierten Betrieb von 1.35 CHF/l). Bei einem Dieselpreis von ca. 2.50 CHF/l wären Dieselbus und Kombilader-E-Busse ungefähr gleich teuer.

Abbildung 26: Vollkostenrechnung und Vergleich mit dem Dieselbus



Annahme: die betrachteten Teilkosten machen beim Dieselbus ca. 35% der Vollkosten aus.

Grafik INFRAS.

Ökologische Auswirkungen

Alle drei E-Bus-Varianten haben im Vergleich zum Dieselbus deutliche ökologische Vorteile. Der Primärenergieverbrauch kann mit den E-Bussen um 30% bis 40% gesenkt werden. Die Treibhausgasemissionen lassen sich um 75% bis 85% reduzieren. Der Betrieb erfolgt bei den Elektrobusen praktisch emissionsfrei. Von den drei E-Bussen schneidet der Depotlader aufgrund der grösseren Batterie am schlechtesten ab.

Abbildung 27: Primärenergieverbrauch der drei E-Bus-Varianten und des Dieselbusses (inkl. Reduktion ggü dem Dieselbus in %)

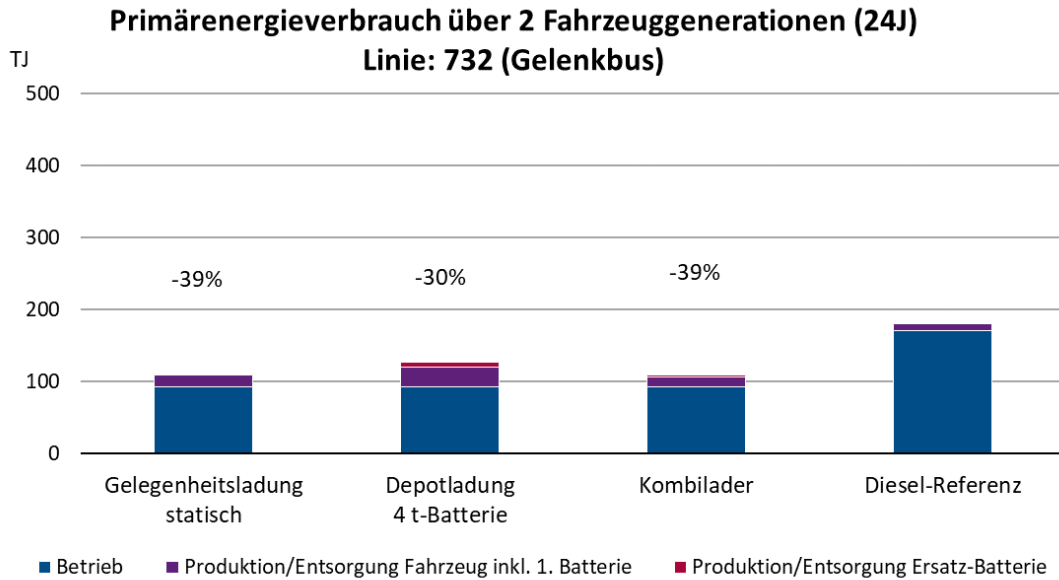
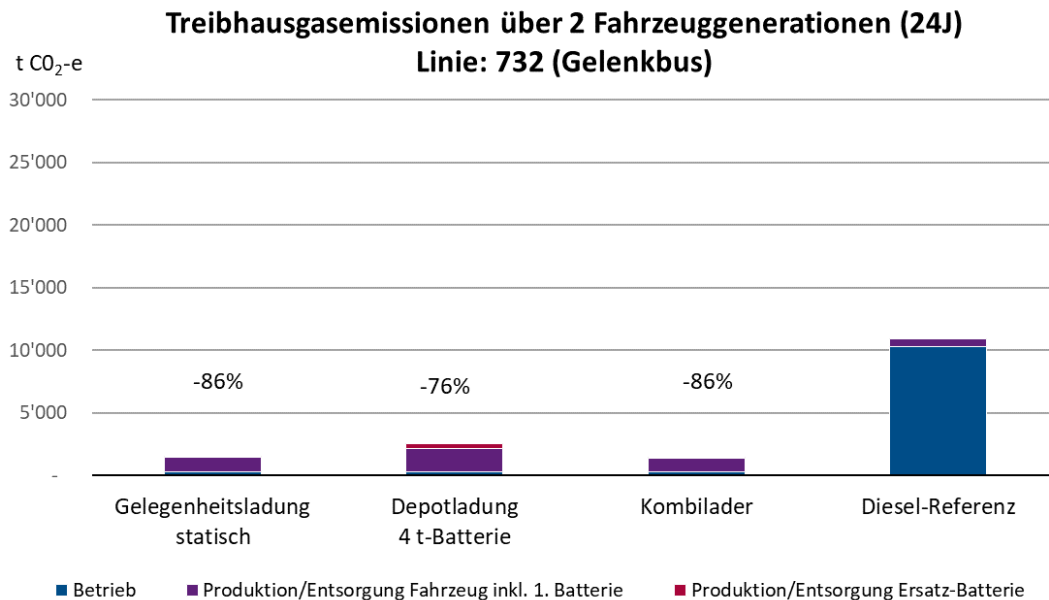


Abbildung 28: Treibhausgasemissionen der drei E-Bus-Varianten und des Dieselbusses (inkl. Reduktion ggü dem Dieselbus in %)



Bemerkung: Bei den Elektrobussen stammen die THG-Emissionen des Betriebs aus der Stromherstellung.

Grafik INFRAS

4.1.5. Regional-Linie 80.300 (Standardbus)

Spezifikationen der E-Bus-Varianten

Tabelle 6: Spezifikationen der E-Bus-Varianten für die Linie 80.300

		Gelegenheitslader statisch	Depotlader
Batterie	Gewicht	1.1 t	4 t
	Kapazität	230 kWh	1'000 kWh (2030) 1'253 kWh (2040)
	max. Reichweite pro Ladung	69 km	316 km (2030) 420 km (2040)
Ladeinfrastruktur	Anzahl Ladestationen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 Schnellladestationen (450 kW): je 1 an den beiden Endhaltestellen ▪ 2 Ladestationen im Depot 	6 Ladestationen im Depot (à 150 kW)
Zusätzliche Fahrzeug-Umläufe		1 (Mo-So)	0
Zusätzliche Fahrzeuge		1	2 (2030 und 2042)
Total Fahrzeugbedarf (ohne Reserve)		5	6

Tabelle INFRAS.

Das Regelangebot auf der Linie 300 wird heute mit vier Bussen gefahren (ohne Reserve). Die Reichweiten der Depotlader-Busse reichen im Zeithorizont 2030 nicht aus, um alle heutigen Fahrzeugeinsätze ohne Nachladen abzudecken. Durch ein optimiertes Einsatzkonzept für die Depotlader-Busse kann die Anzahl zusätzlich notwendiger Fahrzeuge auf zwei minimiert werden. Folgende Abbildung 29 zeigt das Einsatzkonzept für die Linie 80.300. Die Umläufe der vier regulären Kurse, in blau dargestellt, werden ergänzt durch zwei zusätzliche Fahrzeuge (rot dargestellt).

Abbildung 29: Fahrzeugeinsatzkonzept für die Depotlader-Variante der Linie 80.300

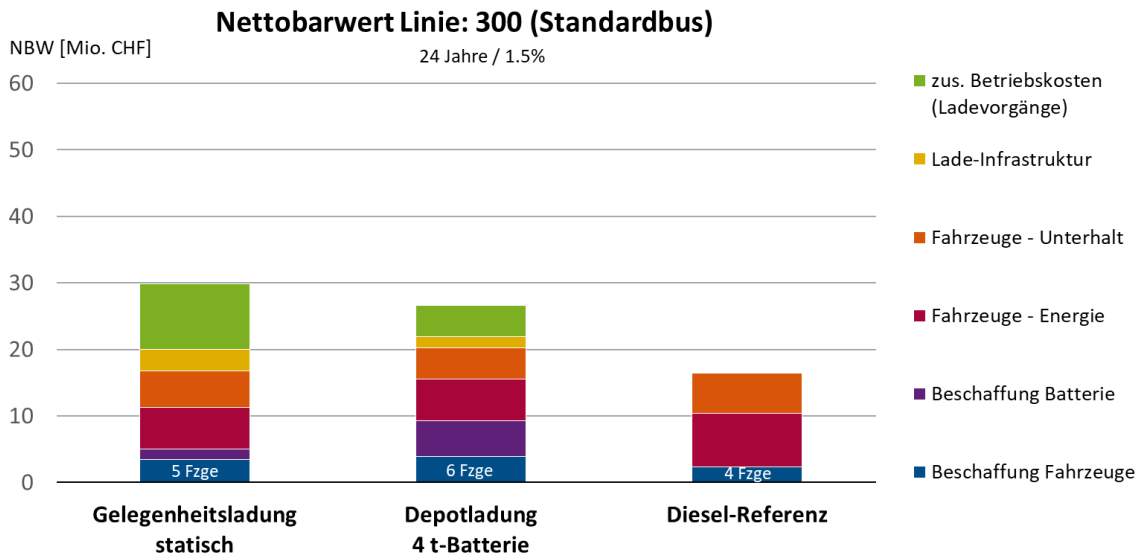
Jahr 2030	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	
Kurs 1	Einsatz (256 km)					Nachladen (4h)					Einsatz (223 km)					ins Depot...						
zus. Fzg.	Kurs 2 (214 km)		Nachladen (4h)		Kurs 1 (148 km)		Kurs 2 (115 km)		Nachladen (3h)		Kurs 1 (148 km)											
Kurs 2	... im Depot		Einsatz (297 km)					Nachladen (3h)					Einsatz (107 km)									
Kurs 3	... im Depot		Einsatz (297 km)					Nachladen (3h)					Einsatz (74 km)									
zus. Fzg.	Kurs 3 (107 km)		Nachladen (3h)		Kurs 4 (190 km)		Kurs 3 (115 km)		Nachladen (4h)		Kurs 4 (115 km)											
Kurs 4	Einsatz (214 km)					Nachladen (5h)					Einsatz (256 km)					ins Depot...						

Grafik INFRAS.

Auswirkungen auf die relevanten Kostenblöcke

Die obigen Mengengerüste werden mit den entsprechenden Kostensätzen verrechnet (s. Annahmen in Annex A2). Diese Kostenberechnungen aller drei E-Bus-Varianten sowie zum Vergleich des Diesebusses führt zu folgenden Resultaten:

Abbildung 30: Teilkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030



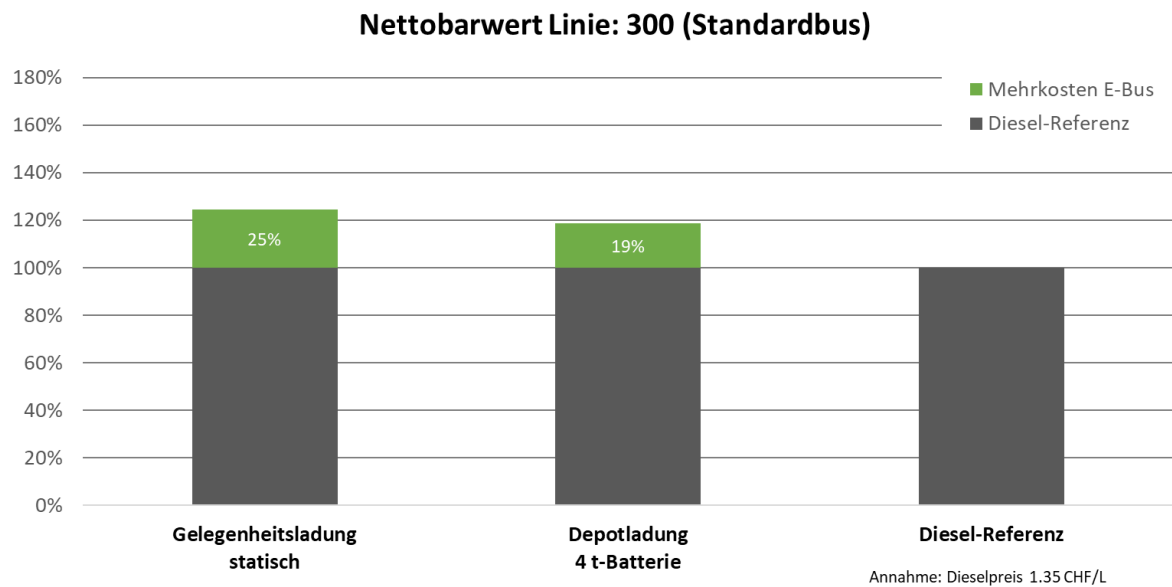
Grafik INFRAS.

Am günstigsten ist für die Linie 80.300 der Depotlader-Bus. Obwohl aufgrund nicht ausreichender Reichweite zwei zusätzliche Fahrzeuge notwendig sind, ist dieser günstiger als der statische Gelegenheitslader. Bei letzterem fallen v.a. die zusätzlichen Betriebskosten aufgrund des zusätzlichen Umlaufs ins Gewicht. Die Unterhalts- und Energiekosten sind bei allen drei E-Bus-Varianten gleich hoch.

Mehrkosten gegenüber Diesel

E-Busse auf der Linie 80.300 sind bezüglich Linienvollkosten rund 20% - 25% teurer gegenüber dem Dieselbus (bei Dieselpreis für konzessionierten Betrieb von 1.35 CHF/l). Bei einem Dieselpreis von ca. 3.50 CHF/l wären Dieselbus und E-Busse ungefähr gleich teuer.

Abbildung 31: Vollkostenrechnung und Vergleich mit dem Dieselbus



Annahme: die betrachteten Teilkosten machen beim Dieselbus ca. 30% der Vollkosten aus.
Grafik INFRAS.

Ökologische Auswirkungen

Alle drei E-Bus-Varianten haben im Vergleich zum Dieselbus deutliche ökologische Vorteile. Der Primärenergieverbrauch kann mit den E-Bussen um 30% bis 40% gesenkt werden. Die Treibhausgasemissionen lassen sich um 80% bis 90% reduzieren. Der Betrieb erfolgt bei den Elektrobusen praktisch emissionsfrei. Von den beiden E-Bussen schneidet der Depotlader aufgrund der grösseren Batterie schlechter ab.

Abbildung 32: Primärenergieverbrauch der drei E-Bus-Varianten und des Dieselbusses (inkl. Reduktion ggü dem Dieselbus in %)

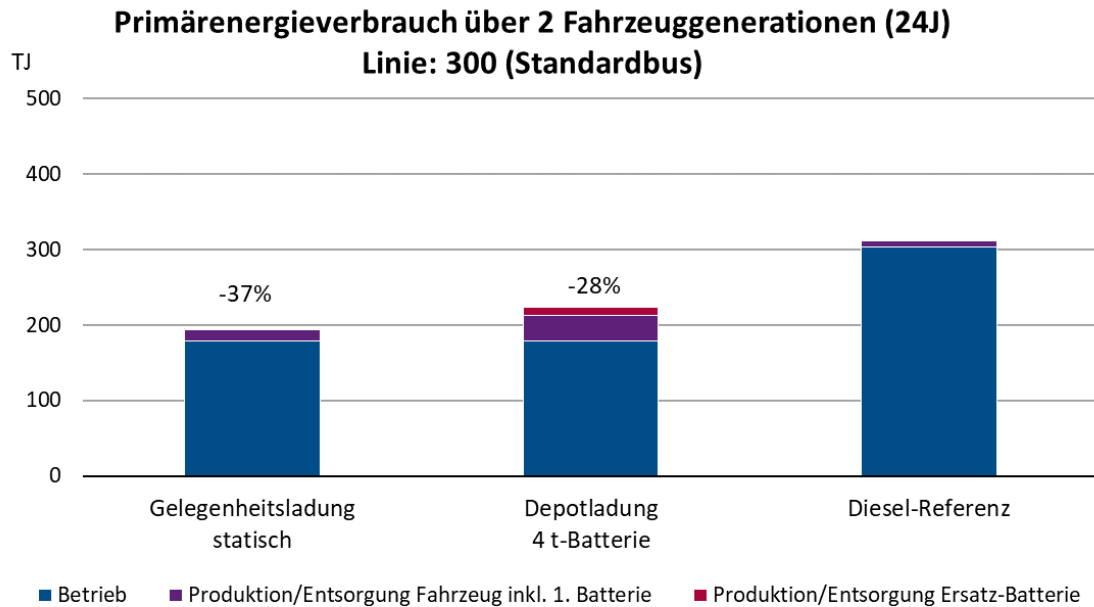
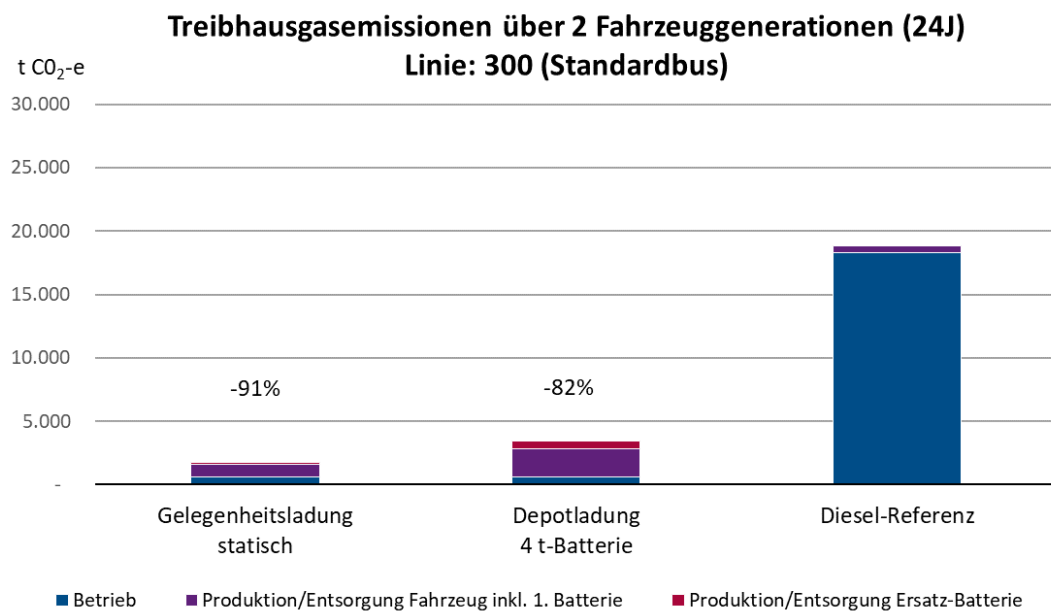


Abbildung 33: Treibhausgasemissionen der drei E-Bus-Varianten und des Dieselbusses (inkl. Reduktion ggü dem Dieselbus in %)



Bemerkung: Bei den Elektrobusen stammen die THG-Emissionen des Betriebs aus der Stromherstellung.

Grafik INFRAS.

4.1.6. Quartier-Linie 80.702 (Midibus)

Spezifikationen der E-Bus-Varianten

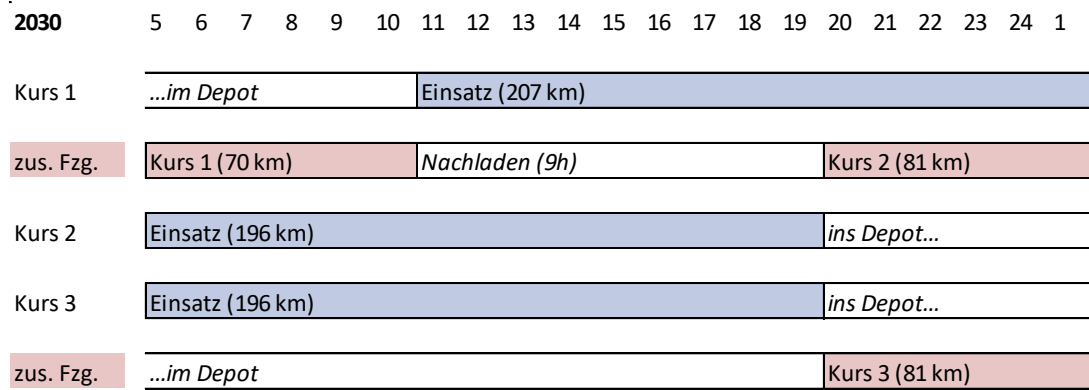
Tabelle 7: Spezifikationen der E-Bus-Varianten für die Linie 80.702

		Gelegenheitslader statisch	Depotlader
Batterie	Gewicht	0.8 t	2.5 t
	Kapazität	75 kWh	625 kWh (2030) 1783 kWh (2040)
	max. Reichweite pro Ladung	25 km	219 km (2030) 291 km (2040)
Ladeinfrastruktur	Anteil neue Oberleitung, Anzahl Ladestationen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 1 Schnellladestation (450 kW): am Bhf. Wil ▪ 1 Ladestation im Depot 	4 Ladestationen im Depot (à 150 kW)
	Zusätzliche Fahrzeug-Umläufe	0	0
	Zusätzliche Fahrzeuge	0	2 (2030) 0 (2042)
	Total Fahrzeugbedarf (ohne Reserve)	3	5

Tabelle INFRAS.

Das Regelangebot auf der Linie 702 wird heute mit drei Bussen gefahren (ohne Reserve). Die Reichweiten der Depotlader-Busse reichen im Zeithorizont 2030 nicht aus, um alle heutigen Fahrzeugeinsätze ohne Nachladen abzudecken. Durch ein optimiertes Einsatzkonzept für die Depotlader-Busse kann die Anzahl zusätzlich notwendiger Fahrzeuge auf zwei minimiert werden. Folgende Abbildung zeigt das Einsatzkonzept für die Linie 80.702. Die Umläufe der regulären Kurse, in blau dargestellt, werden ergänzt durch zwei zusätzliche Fahrzeug (rot dargestellt).

Abbildung 34: Fahrzeugeinsatzkonzept für die Depotlader-Variante der Linie 80.702

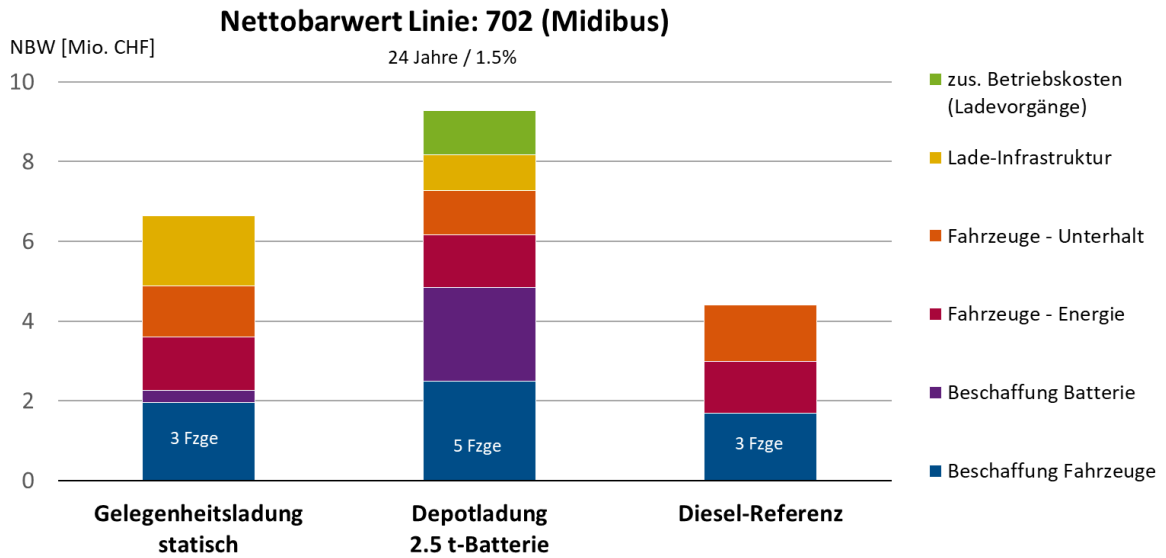


Grafik INFRAS.

Auswirkungen auf die relevanten Kostenblöcke

Die obigen Mengengerüste werden mit den entsprechenden Kostensätzen verrechnet (s. Annahmen in Annex A2). Diese Kostenberechnungen aller drei E-Bus-Varianten sowie zum Vergleich des Diesebusses führt zu folgenden Resultaten:

Abbildung 35: Teilkostenbetrachtung im Zeithorizont 2030



Grafik INFRAS.

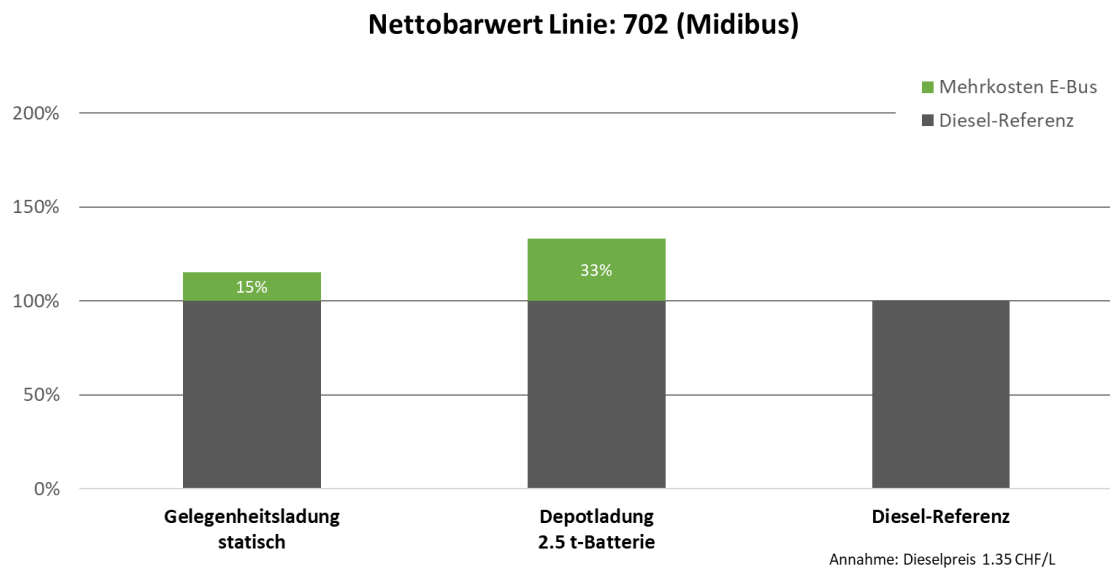
Am günstigsten ist für die Linie 80.702 der statische Gelegenheitslader. Dank genügend langer Ladezeit am Bahnhof Wil sind keine zusätzlichen Fahrzeuge notwendig.

Die Kosten des Depotladers sind deutlich höher, v.a. wegen der zwei zusätzlichen Fahrzeuge. Die Unterhalts- und Energiekosten sind bei allen drei E-Bus-Varianten gleich hoch.

Mehrkosten gegenüber Diesel

E-Busse auf der Linie 80.702 sind bezüglich Linienvollkosten 15% - 33% teurer gegenüber dem Dieselbus (bei Dieselpreis für konzessionierten Betrieb von 1.35 CHF/l). Bei einem Dieselpreis von ca. 4 CHF/l wären Dieselbus und Gelegenheitslader statisch ungefähr gleich teuer.

Abbildung 36: Vollkostenrechnung und Vergleich mit dem Dieselbus



Annahme: die betrachteten Teilkosten machen beim Dieselbus ca. 30% der Vollkosten aus.
Grafik INFRAS.

Ökologische Auswirkungen

Der Primärenergieverbrauch kann mit dem statischen Gelegenheitslader um rund 15% gesenkt werden verglichen mit dem Dieselbus. Der Depotlader verbraucht jedoch im Vergleich zum Dieselbus aufgrund der beiden zusätzlich nötigen Fahrzeuge 6% mehr Primärenergie. Die Treibhausgasemissionen lassen sich jedoch für beide Elektrobusse um 60% bis 80% reduzieren. Der Betrieb erfolgt bei den Elektrobusen praktisch emissionsfrei.

Abbildung 37: Primärenergieverbrauch der beiden E-Bus-Varianten und des Dieselbusses (inkl. Reduktion ggü dem Dieselbus in %)

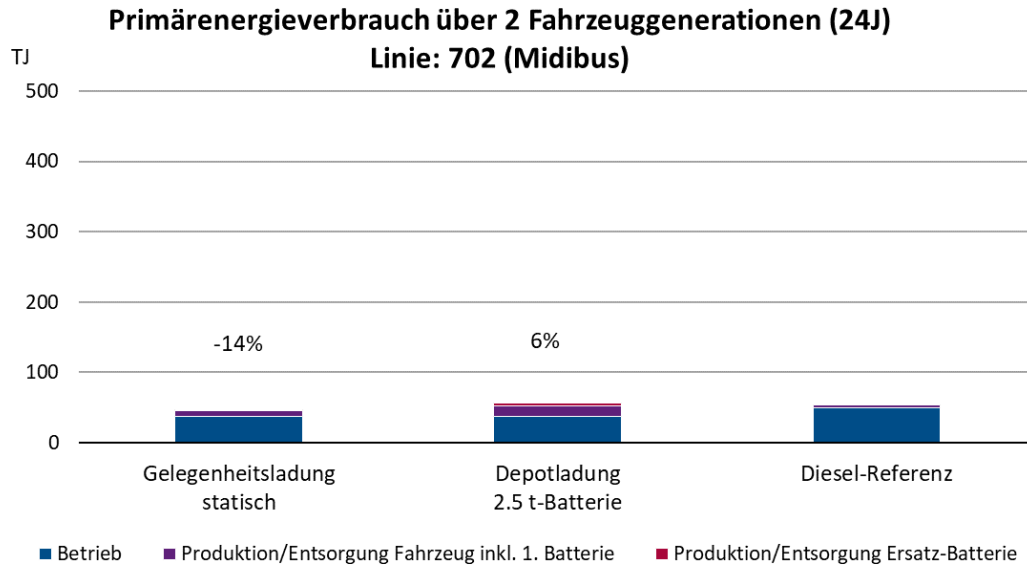
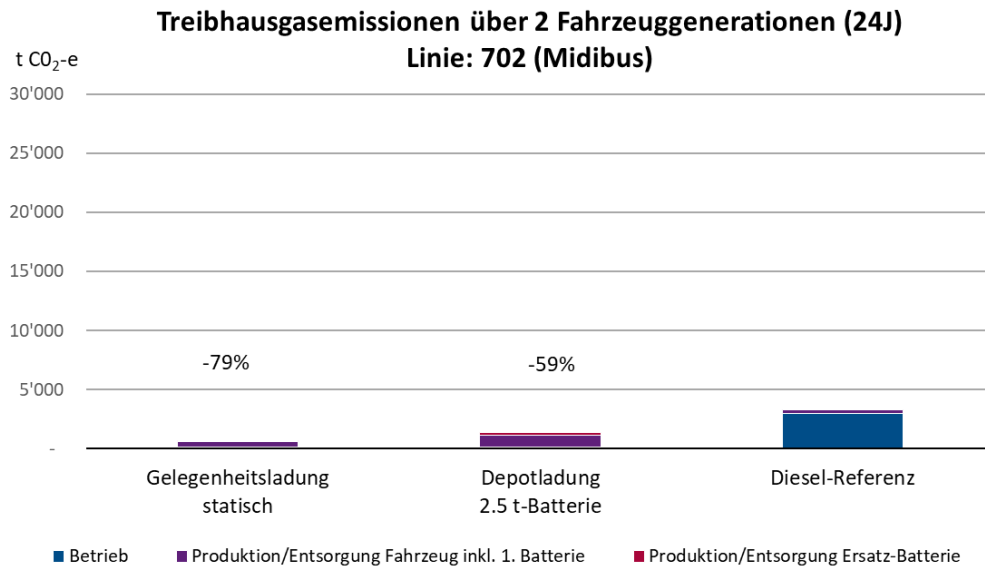


Abbildung 38: Treibhausgasemissionen der beiden E-Bus-Varianten und des Dieselbusses (inkl. Reduktion ggü. dem Dieselbus in %)



Bemerkung: Bei den Elektrobussen stammen die THG-Emissionen des Betriebs aus der Stromherstellung.

4.2. Erkenntnisse Zweckmässigkeitsbetrachtung Linien

Die Analysen haben gezeigt, dass die Zweckmässigkeit der E-Bus-Varianten 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 Kanton St.Gallen 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 mit den Transportunternehmen zu evaluieren.

4.2.1. Ökonomische Bewertung

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

Stadt- und Agglomerations-Linien:

Das IMC-Konzept (Batterietrolleybus) 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 Oberleitungsnetzlänge¹⁴ zum Nachladen der Batterien bereits vorhanden ist. Ein geringer Anteil an zusätzlich zu erstellender Oberleitungsinfrastruktur kann sich beispielsweise auch durch eine Verknüpfung mit einem bereits elektrifizierten 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. D.h. die Wendezeiten müssen genügend lang sein. Linien mit unterschiedlichen Linienendpunkten bzw. Angeboten auf Teilstrecken – wie beispielsweise die untersuchte Linie 80.007/8 – erfüllen diese Bedingung nicht und erfordern eine vergleichsweise teure Ladefrastruktur. Der Gelegenheitslader statisch ist in diesem Fall nicht zweckmässig. Der Depotlader ist insbesondere bei Linien mit HVZ-Verstärker geeignet, weil die Verstärkerkurse nach ihrem Kurzeinsatz im Depot nachgeladen werden können und danach für den Austausch der Regelkurse zur Verfügung stehen. In diesem Fall sind keine zusätzlichen Fahrzeuge notwendig sind (s. Linie 80.732, beschrieben in Kapitel 4.1.4).

¹⁴ Aus bisherigen Erfahrungen mit Batterietrolleybussen gilt ein Richtwert für den Oberleitungsanteil von 40-60% der Linienlänge; der Anteil Oberleitung ist stark abhängig vom Streckenprofil und der resultierenden Länge eines zusammenhängenden fahrleitungsfreien Abschnitts sowie der Nachlademöglichkeit im Falle von Umleitungen und Teilstreckenbetrieb.

Regionallinien:

Bei den Regionallinien steht der Depotlader im Vordergrund. Die i.d.R. aus wirtschaftlichen Überlegungen optimierten Fahrzeugumläufe eignen sich grundsätzlich schlecht für den Gelegenheitslader statisch, weil die Wendezeiten für das Nachladen der Batterien zu kurz sind. Der Einsatz von zusätzlichen Bussen führt – v.a. bei im Stundentakt betriebenen Linien – zu unverhältnismässig langen Standzeiten mit entsprechenden Kostenfolgen. Theoretisch könnte ein Teil dieser Standzeiten zwar für Angebotsverdichtungen genutzt werden; solche dürften jedoch i.d.R. aufgrund des fehlenden Nachfragepotenzials kaum opportun sein.

Wenn entsprechende Voraussetzungen gegeben sind (zeitweise genügend Wendezeit im Fahrplan für teilweises Nachladen, z.B. während der Nebenverkehrszeit wie im Fallbeispiel Linie 80.732), kann neben dem reinen Depotlader auch der Kombilader eine zweckmässige Option darstellen.

Sind sehr lange Tageseinsätze (> 400 bis 500 km) gefordert, welche auch längerfristig nicht mit einem Depotlader ohne Nachladung zu bewältigen sind, stellen Brennstoffzellen-Busse oder Depotlader mit einer Brennstoffzelle als Range Extender sowie allenfalls Biotreibstoffe (z.B. Biodiesel oder Biogas) eine mögliche Option dar.

Batterietrolleybusse sind für Regionallinien ungeeignet, weil der Anteil an Oberleitung – sofern überhaupt vorhanden – viel zu gering ist bzw. unverhältnismässig hohe Oberleitungsinvestitionen anfallen.

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 Abbildung 39 zeigt die aus wirtschaftlicher Sicht zweckmässigen Ladekonzepte bzw. E-Bus-Optionen für die verschiedenen Linien-Cluster.

Abbildung 39: Wirtschaftlich zweckmässige E-Bus-Optionen für die verschiedenen Linien-Cluster

Cluster	Fallbeispiel	Gelegenheitsl. dynamisch IMC	Gelegenheitsl. statisch	Depotlader	Evt. weitere Optionen?
Stadtlinie / Agglolinie	80.007/8 Gelenkbus	✓ wenn ca. 50% der benötigten Oberleitungsbereits vorhanden ist	(✓) wenn keine zus. Busumläufe erforderlich	✓ wenn keine oder nur wenige zus. Busse erforderlich	
	80.151 Gelenkbus				
	80.009 Standardbus	(✓) wenn nur minimale Oberleitungsinfrastruktur erforderlich	(✓) wenn keine zus. Busumläufe erforderlich	✓ wenn keine oder nur wenige zus. Busse erforderlich	
Regionallinie	80.732 Gelenkbus	✗	✗ zu teuer: Ladestat. und zus. Umläufe	✓ evtl. Kombilader	Brennstoffzelle oder Biotreibstoff? (Tageseinsätze über 500 km und mehr)
	80.300 Standardbus	✗	✗ zu teuer: Ladestat. und zus. Umläufen	✓ evtl. Kombilader	Brennstoffzelle oder Biotreibstoff? (Tageseinsätze über 500 km und mehr)
Quartierlinie	80.702 Midibus	✗	✓ wenn keine zus. Busumläufe erforderlich	✓ wenn keine oder nur wenige zus. Busse erforderlich	

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 und 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 bewertet 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 Fahr- und Rollgeräusche des Busses. Dann besteht 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 Oberleitungsnetzordnung dahingehend zu konzipieren, was u.U. einen höheren Anteil Oberleitung bedeuten kann.
- Depotlader können sich nachteilig auf die Personaleinsatzkonzepte auswirken, da Fahrzeug-austauschkonzepte mehr Kurzdienste bzw. «gestückelte» Dienste nach sich ziehen.
- Leistungsbedarf beim Laden: Hohe Leistung bei Gelegenheitsladung an Haltestellen erforderlich; sehr hoher Leistungsbedarf bei grosser Depotladerflotte in den Busgaragen.
- Laden an wichtigen Knotenpunkten wie zum Beispiel am Bhf. St.Gallen für Gelegenheitslader: Realisierung von Ladestationen aus Sicht Platzbedarf und Städtebau schwierig.
- Für Durchmesserlinien an ÖV-Knoten 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 (z.B. in St.Gallen am Spisertor). Zudem besteht allenfalls eine Lärm-Problematik bei Ladestationen im Quartier. Zwar sind Ladestationen im Boden versenkbar, was jedoch die Kosten in die Höhe treibt.

Fahrgastkomfort

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

4.3. Fazit

E-Busse im Vergleich zum heutigen Dieselbus

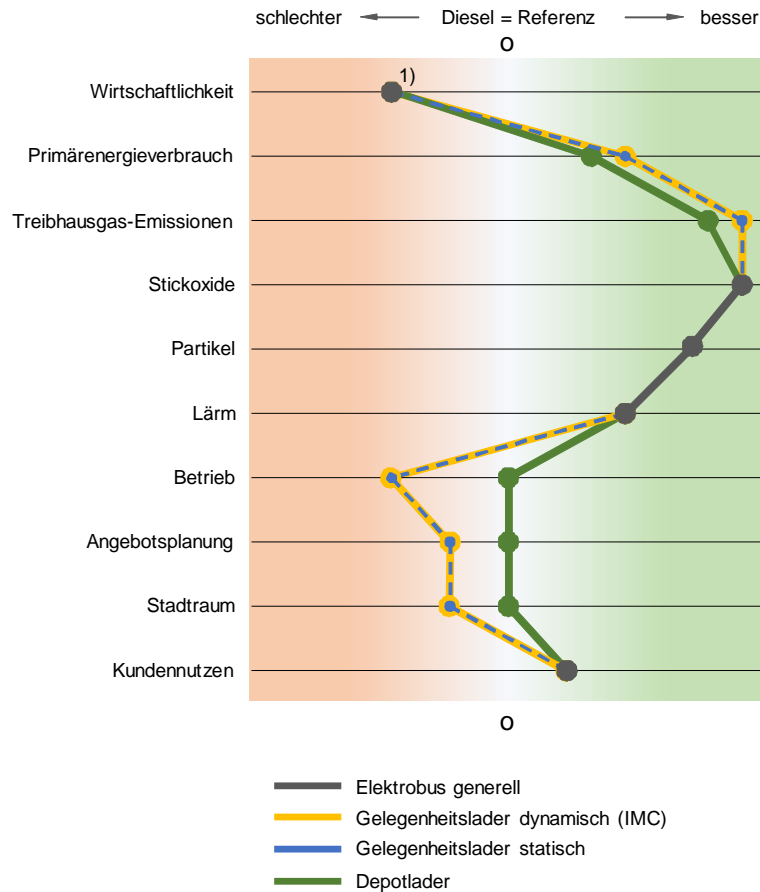
Im Horizont 2030 werden die Vollkosten von Elektrobuslinien aufgrund der teureren Fahrzeuge und Ladeinfrastrukturen bei städtischen und Agglomerationslinien rund 15-20% höher sein als von Dieselbuslinien. Bei den Regionallinien sind je nach Einsatzfeld 10-25% höhere Kosten zu erwarten. Der Dieselpreis müsste stark ansteigen (Treibstoffpreis für konzessionierten Betrieb >2.50 CHF/Liter), damit die Elektrobusse aus betriebswirtschaftlicher Sicht ähnlich oder besser abschneiden wie Dieselbusse. Das ist nur realistisch, wenn Diesel mit einer substantiellen Lenkungsabgabe verteuert und die Rückerstattung der Mineralölsteuer aufgehoben würde.

Mit Elektrobusen lassen sich jedoch deutliche Umweltvorteile gegenüber den Dieselbussen erzielen. Einerseits reduziert der Elektroantrieb den Primärenergieverbrauch um 30% bis 40% (inkl. elektrisch betriebener Klimaanlage und Heizung und unter Berücksichtigung der Fahrzeug-/Batterie-Herstellung und Entsorgung). Andererseits verkehren die Busse praktisch frei von Treibhausgasemissionen, sofern der dazu bezogene Strom aus erneuerbaren Quellen 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 erschweren die Gelegenheitslader Bahnersatzangebote, Ersatzbetriebe bei Betriebsstörungen oder Baustellen, Extrafahrten bei Anlässen etc. Bei der Angebotsgestaltung resultieren vor allem für den Gelegenheitslader statisch Restriktionen, die die Flexibilität einschränken. Beispielsweise bedeuten Linienverlängerungen i.d.R. auch die Verlegung der Ladestationen oder bei Liniensplitting am Liniende oder Verdichtungsangeboten während der Hauptverkehrszeiten zusätzliche Ladestationen. Auch Durchmesserlinien lassen sich mit dem Ladekonzept mit Ladestationen entlang der Linien weniger flexibel umsetzen. Entweder sind Fahrzeuge mit grösseren Batterien erforderlich mit entsprechend zunehmenden Ladezeiten an den Linienden. Oder im Zentrum sind zusätzliche Ladestationen und Ladevorgänge erforderlich, was lange Zwischenhalte zur Folge hat und somit die Attraktivität und Effizienz 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. dem Dieselbus.

Abbildung 40: Übersicht qualitative Bewertung von Elektrobusen gegenüber Dieselbussen im Zeithorizont 2030 unter aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen



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

- 1) Gelegenheitslader dynamisch: wenig zusätzliche Oberleitung
 Gelegenheitslader statisch: keine zus. Fahrzeugumläufe, 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 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 der Regelkurse auch untertags, ohne dass die Fahrzeugflotte vergrößert werden muss. Längerfristig wird der Einsatz von Depotladern auch auf Linien mit Tageseinsätzen von 350 bis 450 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 gegenüber dem Depotlader auch 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 eine 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 mit den Transportunternehmen zu evaluieren. Dabei sind jeweils die spezifischen Randbedingungen vor Ort zu berücksichtigen.

5. Strategie

Die Strategie zeigt keinen detaillierten Umsetzungspfad auf, sondern zeigt Fahrzeug- und Einsatzoptionen auf, mit denen das strategische Fernziel «100% Elektrobusse oder Busse mit alternativen Antrieben im ÖV» am ehesten erreicht werden könnte. Sie fokussiert auf monetäre, technische und betriebliche Aspekte. Die Umweltvorteile von Elektrobussen gegenüber Dieselnissen werden bereits in Kapitel 4 detailliert diskutiert. Da zwischen den verschiedenen E-Bussen keine wesentlichen Unterschiede bzgl. ökologischer Aspekte bestehen, liegen diese nicht im Fokus der Strategie.

5.1. Langfristige Strategie

5.1.1. Stadt- und Agglomerationslinien

Stadt und Agglomeration St.Gallen

Das Busliniennetz in diesem Raum soll langfristig aus einer Mischflotte mit dynamischen Gelegenheitsladern (IMC oder Batterietrolleybus) und Depotladern bestehen:

- Bei anstehendem Fahrzeugersatz von Trolleybussen IMC-fähige Fahrzeuge 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 und Mitbenutzungsmöglichkeit von bestehendem Oberleitungsnetz bzw. minimaler Bedarf an zusätzlicher Oberleitungsinvestitionen; Richtwert: IMC ist gegenüber Depotlader wirtschaftlich interessant, wenn maximal 50% des erforderlichen Fahrleitungsnetzes¹⁵ zum Nachladen der Batterien neu erstellt werden muss;
- Restliche Linien mit Depotlader:
 - Gelenkbuslinien, für welche IMC nicht zweckmässig ist (u.a. Linien mit einem hohen Anteil an HVZ-Verstärker bzw. hohem, neu zu erstellenden Oberleitungsnetz);
 - alle Normalbus- und Midibuslinien.

Mit dieser Strategie bleiben bestehende Trolleybus-Systeme vom Grundsatz her erhalten. Sie werden jedoch aufgrund des technologischen Fortschritts bei den Batterien flexibilisiert, indem 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-Lade-

¹⁵ Erforderliche Fahrleitungsnetzlänge einer Linie liegt bei 40-60%.

system bietet damit die Chancen, das Trolleybussystem in der Agglomeration St.Gallen 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 im städtischen Raum 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.

Übrige städtische Gebiete

In den übrigen städtischen Gebieten im Kanton St.Gallen ohne bestehendes Oberleitungsnetz soll auf Depotlader umgestiegen werden. Falls die spezifischen Rahmenbedingungen (ausreichende Wendezeiten für das Nachladen der Batterien an den Endhaltestellen) auch für einen statischen Gelegenheitslader gegeben sind, sollen die beiden Optionen vertieft geprüft werden.

5.1.2. Regionallinien

Die Agglomerations- und Regionallinien sind auf Depotlader-Busse umzustellen. Allenfalls sind sog. Kombilader-Konzepte zu prüfen, um die Reichweiten zu erhöhen bzw. die Batteriegrösse zu reduzieren.

Für Linien, welche Reichweiten über 400 – 450 km erfordern, sind Depotlader-Batteriebusse mit Range Extender, (mit Brennstoffzelle oder über Verbrennungsmotor (mit Biotreibstoff angetriebener Generator) zu prüfen. Als Alternative sind auch konventionelle Brennstoffzellenbusse oder mit Biotreibstoffen betriebene Busse denkbar.

5.1.3. Quartierlinien

Für Quartierlinien ist jeweils unter Berücksichtigung der spezifischen Rahmenbedingungen die Umstellung auf Depotlader oder statischen Gelegenheitslader zu prüfen.

5.2. Zwischenschritte 2025/2030

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

Stadt und Agglomeration St.Gallen

- **Erweiterung des Trolleybusnetzes durch IMC**, sofern aus wirtschaftlicher Sicht auch längerfristig gegenüber dem Depotlader vorteilhaft (geringer Anteil an neu zu erstellender Oberleitung, keine HVZ-Verstärker); als mögliche Linie bieten sich die städtischen Linien 80.007/008 und die Agglomerationslinie 80.151 an.
- **Depotlader**, sofern auch längerfristig IMC keine zweckmässige Alternative darstellt, **als Pilot** für Linien, auf welchen die noch vergleichsweise geringen Reichweiten nicht zu zusätzlichem Fahrzeugbedarf führen – z.B. auf der Linie 80.009.

Übrige städtische Gebiete

- Depotlader als Pilot.

Regionallinien

- **Pilot** mit Depotladern für Linien, für welche in diesem Zeithorizont möglichen Reichweiten einen zweckmässigen Einsatz ohne zusätzlichen Fahrzeugbedarf erlauben. Kurzfristig wären auch Pilotversuche mit **Kombiladern** (mit beispielsweise mobilen Ladestationen an den Endhaltestellen) denkbar – z.B. auf der Linie 80.732.
- Um kurzfristig bereits Umweltvorteile erzielen zu können, sind auch Plug-in-Hybrid-Busse (Vorinvestitionen im Depot für späteren Umstiege auf Depotlader) zu prüfen.

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. An den typischen Standorten von Busdepots sowohl in der Stadt als auch in der Region (Gewerbe-/Industriegebiete) ist in der Regel eine Anschlussleistung von 5 MW möglich. Bei einer grösseren Depotlader-Flotte ist ergänzend ein intelligentes Lademanagement vorzusehen, um den Leistungsbedarf zu minimieren. Im konkreten Fall sind die Stromversorgung bzw. die dazu notwendigen Massnahmen im Detail zu prüfen.

Gelegenheitslader brauchen ebenfalls Ladeinfrastruktur in den Depots. Aufgrund der relativ kleinen Batterien bei diesen Bussen ist die benötigte Ladeleistung pro Bus gering. Deshalb

stellt auch eine grosse Gelegenheitslader-Flotte keine besonders hohen Anforderungen 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 Kanton St.Gallen.

Die Verkehrsbetriebe Zürich beispielsweise setzen in ihrer Elektrobusstrategie «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. Auf Quartier- und Standardbuslinien sollen künftig vermehrt umweltfreundliche Batteriebusse zum Einsatz kommen, die in der Garage – über Nacht oder auch tagsüber – aufgeladen werden können.

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

Die Verkehrsbetriebe Basel, welche über kein Trolleybusnetz verfügen, verfolgen aktuell das Ziel, mittelfristig das bestellte Bus-Angebot vollumfänglich mit Elektrobusen mit Depotladung und allfälligen Varianten davon zu erbringen. Zurzeit steht ein Depotlader-Gelenkbus im Testeinsatz.

Auch die Zugerland Verkehrsbetriebe (ZVB) verfolgen eine Strategie mit Depotladern. Sie setzen seit Herbst 2019 einen Batteriebus im Regelbetrieb ein, um Fragen im Bereich Unterhalt und Betrieb vertiefter zu klären. Bis 2021 soll eine ganze Linie auf E-Busse umgestellt werden.

Der Verkehrsverbund Luzern (VVL) hat vor Kurzem eine umfangreiche E-Bus-Strategie erarbeitet, um seine Vision umzusetzen: «Im Jahr 2040 fahren im Kanton Luzern nur noch mit erneuerbarer Energie betriebene, energieeffiziente und emissionsarme Busse». Dabei wird auf städtischen Linien vorderhand auf die Erweiterung des Trolleybusnetzes durch IMC gesetzt. Wo

IMC auch längerfristig keine zweckmässige Alternative darstellt, sollen Depotlader zum Einsatz kommen. Auch auf Agglomerations- und Regionallinien sind Depotlader erste Wahl, falls sie keinen grossen zusätzlichen Fahrzeugbedarf auslösen. Um kurzfristig bereits Umweltvorteile erzielen zu können, sollen allenfalls auch Plug-in-Hybrid-Busse oder Biodiesel-Busse geprüft werden.

Die Verkehrsbetriebe Schaffhausen (VBSH) setzen ebenfalls auf Elektrobusse und möchten bis 2027 die ganze Flotte umstellen. Zur Ablösung der Dieselsebusse sind Elektrobusse mit Schnellladesystem an den Haltestellen (Gelegenheitslader statisch) vorgesehen. Die heute mit klassischen Trolleybussen betriebene Linie 1 wird auf Batterietrolleybusse mit IMC-Ladekonzept umgerüstet.

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 des Kantons St.Gallen periodisch überprüft werden. Dabei sind insbesondere die technische Entwicklung der Batteriebusse, aber auch alternativen Antriebsoptionen zu beachten. Abhängig von den aktuellen Entwicklungen ist die E-Bus-Strategie zu aktualisieren. Insbesondere für die Evaluation von konkreten Projekten ist der jeweils aktuelle Wissensstand heranzuziehen.

6. Rolle des Kantons als Besteller

Bestellerstrategie

Die nun vorliegende Strategie gibt den Rahmen für die Beschaffung und den Einsatz von Bussen mit alternativen Antrieben vor. Sie gilt vorläufig für das Bestellverfahren 2022/2023. Offen ist noch, ob die vorliegende Strategie auch für das anschliessende Bestellverfahren 2024/2025 angewendet werden soll. Es ist nicht auszuschliessen, dass aufgrund der technischen Entwicklung eine Anpassung der Strategie notwendig wird.

Bestellervorgaben

Aus Sicht des Kantons als Besteller des öffentlichen Verkehrs sollen folgende Vorgaben gelten:

- Will ein Unternehmen Busse (Fahrzeugsatz oder -erweiterung) mit alternativen Antrieben (E-Busse, Brennstoffzellen-Busse oder Hybrid-Busse) beschaffen, so ist dem Kanton St.Gallen vorgängig ein Konzept zu unterbreiten. Mit dem Konzept ist aufzuzeigen, welche Fahrzeuge beschafft werden, welche Infrastruktur für den Betrieb erforderlich ist und welche Mehrkosten gegenüber dem bisherigen Betrieb jährlich anfallen. Das Konzept ist zwingend mit dem Kanton St.Gallen abzustimmen. Sofern erforderlich wird sich dieser mit dem BAV oder mitbestellende Nachbarkantonen absprechen. Priorität bei der Beschaffung haben E-Busse gemäss der vorliegenden Strategie.
- Für die Bestellperiode 2022/2023 wird es von den Abläufen/Fristen her erst vereinzelt möglich sein, E-Busse gemäss Strategie zu beschaffen; deshalb werden Busbeschaffungen in diesem Horizont i.d.R. noch 1:1 Ersatz-Beschaffungen sein (d.h. Dieselbusse oder bei den VBSG auch Trolleybusse). Jedoch sollen von Transportunternehmen im Rahmen der mittelfristigen Investitionsplanungen entsprechende Hinweise zuhanden Besteller gemacht werden, wenn spätere Beschaffungen von E-Bussen bereits geplant sind.
- Der abschliessende Entscheid über die Ladestrategie für E-Busse liegt beim Besteller. Dieser finanziert die Mehrkosten für den Betrieb (die Investitionen bzw. die Abschreibungs- und Unterhaltskosten werden ebenfalls via Abgeltung finanziert).
- Der Kanton St.Gallen prüft (allenfalls mit den mitbestellenden Nachbarkantonen und dem BAV), ob die Beschaffung strategiekonform und finanzierbar ist.

A1. Annahmen zur Entwicklung der Batterien

A1.1. 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

Details zu Energiedichte, spezifische Kosten pro kWh, Batteriegewichte und Batteriekosten sind auf den folgenden Seiten zusammengestellt.

A1.2. Batterien mit hoher Energiedichte (für Depotlader)

Jahr	Midibus 2.5-Tonnen-Batterie				Standardbus 4-Tonnen-Batterie				Gelenkbus 4-Tonnen-Batterie			
	Kapazität [kWh]	Reale Reichweite [km/Ladung]	Kosten [CHF/kWh]	Kosten [CHF/Batterie]	Kapazität [kWh]	Reale Reichweite [km/Ladung]	Kosten [CHF/kWh]	Kosten [CHF/Batterie]	Kapazität [kWh]	Reale Reichweite [km/Ladung]	Kosten [CHF/kWh]	Kosten [CHF/Batterie]
2030	625	219	309	193'324	1'000	316	309	309'319	1'000	252	309	309'319
2031	645	227	288	186'005	1'032	327	288	297'608	1'032	262	288	297'608
2032	664	235	269	178'810	1'062	338	269	286'096	1'062	271	269	286'096
2033	681	242	253	171'836	1'089	349	253	274'937	1'089	279	253	274'937
2034	696	249	237	165'149	1'114	358	237	264'238	1'114	287	237	264'238
2035	710	255	224	158'794	1'137	368	224	254'071	1'137	294	224	254'071
2036	724	261	211	152'800	1'158	376	211	244'480	1'158	301	211	244'480
2037	736	267	200	147'179	1'177	385	200	235'487	1'177	308	200	235'487
2038	747	272	190	141'937	1'195	392	190	227'099	1'195	314	190	227'099
2039	757	278	181	137'068	1'211	400	181	219'308	1'211	320	181	219'308
2040	767	282	173	132'563	1'226	407	173	212'101	1'226	325	173	212'101
2041	775	287	166	128'410	1'240	413	166	205'456	1'240	331	166	205'456
2042	783	291	159	124'591	1'253	420	159	199'346	1'253	336	159	199'346
2043	791	296	153	121'089	1'265	426	153	193'742	1'265	341	153	193'742
2044	797	300	148	117'885	1'276	432	148	188'615	1'276	345	148	188'615
2045	803	304	143	114'959	1'286	437	143	183'934	1'286	350	143	183'934
2046	809	307	139	112'291	1'295	442	139	179'666	1'295	354	139	179'666
2047	814	311	135	109'864	1'303	448	135	175'783	1'303	358	135	175'783
2048	819	314	131	107'659	1'311	453	131	172'254	1'311	362	131	172'254
2049	824	318	128	105'658	1'318	457	128	169'052	1'318	366	128	169'052
2050	828	321	125	103'844	1'325	462	125	166'150	1'325	369	125	166'150
2051	832	324	123	102'201	1'331	466	123	163'522	1'331	373	123	163'522
2052	835	327	121	100'716	1'336	471	121	161'145	1'336	376	121	161'145
2053	838	330	119	99'374	1'341	475	119	158'998	1'341	380	119	158'998
2054	841	333	117	98'162	1'346	479	117	157'059	1'346	383	117	157'059
2055	844	335	115	97'069	1'350	483	115	155'310	1'350	386	115	155'310
2056	846	338	114	96'083	1'354	487	114	153'733	1'354	389	114	153'733
2057	849	341	112	95'196	1'358	490	112	152'313	1'358	392	112	152'313
2058	851	343	111	94'397	1'361	494	111	151'034	1'361	395	111	151'034
2059	853	346	110	93'678	1'364	498	110	149'884	1'364	398	110	149'884
2060	855	348	109	93'031	1'367	501	109	148'850	1'367	401	109	148'850

A1.3. Batterien mit hoher Leistung (Gelegenheitslader)

Jahr	Midibus 2.5-Tonnen-Batterie				Standardbus 4-Tonnen-Batterie				Gelenkbus 4-Tonnen-Batterie			
	Kapazität [kWh]	Reale Reichweite [km/Ladung]	Kosten [CHF/kWh]	Kosten [CHF/Batterie]	Kapazität [kWh]	Reale Reichweite [km/Ladung]	Kosten [CHF/kWh]	Kosten [CHF/Batterie]	Kapazität [kWh]	Reale Reichweite [km/Ladung]	Kosten [CHF/kWh]	Kosten [CHF/Batterie]
2030	173	60	586	101'116	173	54	586	101'116	173	44	586	101'116
2031	179	63	542	97'211	179	57	542	97'211	179	45	542	97'211
2032	185	66	503	93'267	185	59	503	93'267	185	47	503	93'267
2033	191	68	468	89'363	191	61	468	89'363	191	49	468	89'363
2034	196	70	436	85'558	196	63	436	85'558	196	51	436	85'558
2035	201	72	407	81'893	201	65	407	81'893	201	52	407	81'893
2036	205	74	382	78'397	205	67	382	78'397	205	53	382	78'397
2037	209	76	358	75'089	209	68	358	75'089	209	55	358	75'089
2038	213	78	338	71'979	213	70	338	71'979	213	56	338	71'979
2039	217	79	319	69'071	217	71	319	69'071	217	57	319	69'071
2040	220	81	302	66'364	220	73	302	66'364	220	58	302	66'364
2041	223	82	287	63'856	223	74	287	63'856	223	59	287	63'856
2042	225	84	273	61'538	225	75	273	61'538	225	60	273	61'538
2043	228	85	261	59'404	228	77	261	59'404	228	61	261	59'404
2044	230	86	250	57'444	230	78	250	57'444	230	62	250	57'444
2045	232	88	240	55'648	232	79	240	55'648	232	63	240	55'648
2046	234	89	231	54'006	234	80	231	54'006	234	64	231	54'006
2047	236	90	223	52'507	236	81	223	52'507	236	65	223	52'507
2048	237	91	215	51'142	237	82	215	51'142	237	66	215	51'142
2049	239	92	209	49'899	239	83	209	49'899	239	66	209	49'899
2050	240	93	203	48'771	240	84	203	48'771	240	67	203	48'771
2051	242	94	198	47'746	242	85	198	47'746	242	68	198	47'746
2052	243	95	193	46'818	243	85	193	46'818	243	68	193	46'818
2053	244	96	189	45'977	244	86	189	45'977	244	69	189	45'977
2054	245	97	185	45'217	245	87	185	45'217	245	70	185	45'217
2055	246	98	181	44'530	246	88	181	44'530	246	70	181	44'530
2056	246	98	178	43'909	246	89	178	43'909	246	71	178	43'909
2057	247	99	175	43'349	247	89	175	43'349	247	71	175	43'349
2058	248	100	173	42'844	248	90	173	42'844	248	72	173	42'844
2059	249	101	171	42'388	249	91	171	42'388	249	73	171	42'388
2060	249	101	168	41'978	249	91	168	41'978	249	73	168	41'978

A1.4. Batterie, Brennstoffzelle und Wasserstofftank

Gelenkbus								
Batterie			Brennstoffzelle		Wasserstofftank			
Kapazität [kWh]	Kosten [CHF/kWh]	Kosten [CHF/Batterie]	Masse [kg]	Kosten [CHF/Stck]	Masse [kg]	Kosten [CHF/Stck]	Energiespei- cherdichte [kWh/kg Tank]	
10	586	385	385	189'787	1'014	67'147	2.24	
10	542	383	383	180'219	999	65'890	2.28	
10	503	381	381	172'086	984	64'695	2.31	
10	468	379	379	165'173	970	63'560	2.35	
10	436	377	377	159'297	956	62'482	2.38	
10	407	375	375	154'303	943	61'458	2.41	
10	382	374	374	150'057	931	60'485	2.44	
10	358	372	372	146'449	920	59'561	2.47	
10	338	371	371	143'381	909	58'683	2.50	
10	319	369	369	140'774	898	57'849	2.53	
10	302	368	368	138'558	888	57'056	2.56	
10	287	367	367	136'674	879	56'304	2.59	
10	273	365	365	135'073	870	55'588	2.62	
10	261	364	364	133'712	861	54'909	2.64	
10	250	363	363	132'555	853	54'264	2.67	
10	240	362	362	131'572	846	53'650	2.69	
10	231	361	361	130'736	838	53'068	2.71	
10	223	360	360	130'026	831	52'514	2.74	
10	215	359	359	129'422	825	51'989	2.76	
10	209	358	358	128'909	819	51'489	2.78	
10	203	357	357	128'472	813	51'015	2.80	
10	198	357	357	128'102	807	50'564	2.82	
10	193	356	356	127'786	802	50'136	2.84	
10	189	355	355	127'518	797	49'729	2.86	
10	185	355	355	127'291	792	49'343	2.87	
10	181	354	354	127'097	787	48'976	2.89	
10	178	353	353	126'932	783	48'627	2.91	
10	175	353	353	126'793	779	48'295	2.92	
10	173	352	352	126'674	775	47'981	2.94	
10	171	352	352	126'573	771	47'682	2.95	
10	168	351	351	126'487	767	47'398	2.96	

A2. Annex 2: Annahmen für die Kostenrechnung

A2.1. Allgemeine Annahmen

	Einheit	Gelenkbus	Standardbus	Midibus
spezifischer Energiebedarf inkl. Heizung/Lüftung/Klima (Strom) *1)	kWh/km	2.5	2.0	1.8
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
spezifischer Energiebedarf inkl. Heizung/Lüftung/Klima (Brennstoffzelle)	kWh/km	3.9	2.8	kommt nicht vor
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	
Anzahl Gleichrichter pro km Oberleitung	#/km		0.5	
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		10	
Abnahme Fahrzeugkosten real pro Jahr	%		1%	
Abnahme spezifischer Energieverbrauch real pro Jahr	%		0.5%	
Realer Zinssatz	%		1.5%	
Stromkosten	CHF/kWh		0.15	
Dieselskosten (Treibstoffzoll-Rückerstattung bereits abgezogen, ohne MWSt.)	CHF/L		1.35	
Kosten Wasserstoff	CHF/kg		14	

Quellen: Annahmen INFRAS, d.h. Erfahrungswerte aus den vorangehenden Studien für Zürich, Basel und Luzern

*1): die Werte zum spezifischen Energieverbrauch bilden «mittlere» Verhältnisse ab – je nach Topographie, Heiz-/Kühlbedarf, Umgebungstemperatur etc. können diese leicht schwanken.

A2.2. Kostenannahmen Busse

			Gelenkbus	Standardbus	Midibus
Fahrzeugkosten 2030 (ohne Batterie)	Dieselbus	CHF/Bus	452'191	316'534	298'446
	Batterietrolleybus	CHF/Bus	507'059	371'402	kommt nicht vor
	Gelegenheitslader	CHF/Bus	507'059	371'402	353'314
	Depotlader	CHF/Bus	487'059	351'402	333'314
	Brennstoffzellenbus	CHF/Bus	487'059	kommt nicht vor	kommt nicht vor
Wartung-/Unterhaltskosten Fahrzeug 2030	Dieselbus	CHF/km	0.50	0.38	0.38
	Batterietrolleybus	CHF/km	0.48	0.36	kommt nicht vor
	Gelegenheitslader	CHF/km	0.46	0.35	0.35
	Depotlader	CHF/km	0.40	0.30	0.30
	Brennstoffzellenbus	CHF/km	0.55	kommt nicht vor	kommt nicht vor
Batteriekosten 2030	Batterietrolleybus (75 kWh)	CHF/Batterie	43'950	43'950	kommt nicht vor
	Gelegenheitslader (75 kWh)	CHF/Batterie	43'950	43'950	43'950
	Gelegenheitslader (120 kWh)	CHF/Batterie	70'332	70'332	70'332
	Depotlader	CHF/Batterie	5-Tonnen 309'319	4 Tonnen 309'319	3 Tonnen 193'324
Batteriekosten 2030	Brennstoffzellenbus	CHF/Batterie	5'858	kommt nicht vor	kommt nicht vor
Kosten Brennstoffzelle 2030		CHF/Zelle	189'787	kommt nicht vor	kommt nicht vor
Kosten Wasserstofftank 2030		CHF/Tank	67'147	kommt nicht vor	kommt nicht vor

A2.3. Kostenannahmen Ladeinfrastruktur

		Varianten			Brennstoffzelle	Bemerkungen
		Gelegenheitsladung konduktiv-dynamisch (Batterietrolleybus)	Gelegenheitsladung konduktiv-statisch	Depotladung konduktiv-statisch		
Oberleitung Investition	CHF/km	CHF 800.000				pro Fahrriichtung
Oberleitung Unterhalt	CHF/a/km	CHF 16.000				2% der Investition
Stromversorgung mit Trafo und Gleichrichter	CHF/km	CHF 600.000				für beidseitige Leitungsführung
Unterhalt Gleichrichter	CHF/a/km	CHF 12.000				2% der Investition Stromversorgung
Schnellladestation (450 kW) Investition	CHF/Stk		CHF 800.000			
Schnellladestation (450 kW) Unterhalt	CHF/a/Stk		CHF 16.000			2% der Investitionskosten
Schnellladestation (450 kW) Anschlusskosten	CHF/Stk		CHF 0			in Investitionskosten enthalten
Ladepplatz im Depot (150 kW) Investition	CHF/Stk	CHF 85.000	CHF 85.000	CHF 85.000		
Ladepplatz im Depot (150 kW) Unterhalt	CHF/a/Stk	CHF 4.250	CHF 4.250	CHF 4.250		5% der Investitionskosten
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		
Wasserstofftankstelle (inkl. Elektrolyse) Investition	CHF/Stk				CHF 2.260.955	
Wasserstofftankstelle (inkl. Elektrolyse) Unterhalt	CHF/a/Stk				CHF 113.048	
Wasserstofftankstelle (inkl. Elektrolyse) Anschlusskosten	CHF				CHF 100.000	
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')

Glossar

BOS	BUS Ostschweiz AG
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.
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
EN 590	«Dieselnorm»
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
NVZ	Nebenverkehrszeit
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
VBSG	Verkehrsbetriebe St.Gallen

Literatur

Althaus, H.J. and Gauch, M. (2010): Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität: Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen. Dübendorf, 2010.

Bhandari, R., C. Trudewind, P. Zapp (2012): "Life Cycle Assessment of Hydrogen Production Methods - A Review" Forschungszentrum Jülich, Institut für Energie- und Klimaforschung, Jülich.

Cox, B. and Bauer, C. (2018): Environmental assessment of current and future passenger vehicles in Switzerland: Report for the Swiss Federal Office for Energy. PSI.

Cox B (2018): Mobility and the Energy transition. Diss. ETH NO 25081

Cox, B., A. Castillo, and Mutel, C. (2017): Environmental assessment of current and future urban buses with different energy sources, in The 30th International Electric Vehicle Symposium & Exhibition. Stuttgart. <http://papers.evs30.org/proceedings/>.

ecoinvent v3.5 (2016): Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B. et al. Int J Life Cycle Assess. 21: 1218. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

Hirschberg, S., et al. (2016): Opportunities and challenges for electric mobility: an interdisciplinary assessment of passenger vehicles. 2016. PSI, EMPA, ETH.

INFRAS (2018): Systemevaluation Bus der Zukunft für die Basler Verkehrsbetriebe, Vorstudie, Zürich.

INFRAS (2019): HBEFA 4.1, Handbook of emission factors for road transport (HBEFA). www.hbefa.net

INFRAS (2019): E-Bus-Strategie, Schlussbericht. Verkehrsverbund Luzern, Zürich.