

Verkehrsverbund Luzern VVL

Fossilfreier ÖV im Kanton Luzern

Aktualisierte Strategie und Umsetzung für den bestellten Busverkehr

Gesamtbericht

Zürich, 2. Mai 2024

Matthias Lebküchner (INFRAS), Stephan Brändli (OGS), Roberto Bianchetti (INFRAS)



Impressum

Fossilfreier ÖV im Kanton Luzern

Aktualisierte Strategie und Umsetzung für den bestellten Busverkehr

Gesamtbericht

Zürich, 2. Mai 2024

3852a_VVL-fossilfrei_Gesamtbericht-final_20240502.docx

Auftraggeber

Verkehrsverbund Luzern VVL

Projektleitung

VVL: Brigitte Schön, Daniel Heer

Begleitende Projektgruppe

VVL

Transportunternehmen: vbl, PAG, AAGR, ARAG, BSF (ZVB)

Lokale Energielieferanten: CKW, ewl

Klimaexperte Kt. Luzern

Autorinnen und Autoren

Matthias Lebküchner (INFRAS), Stephan Brändli (OGS), Roberto Bianchetti (INFRAS)

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

info@infras.ch

Inhalt

Zusammenfassung	5
1. Einleitung	9
2. Überprüfung der Strategie 2019	10
2.1. Marktentwicklung E-Busse und alternative Antriebe	10
2.2. Technologieentwicklung	13
2.2.1. Technische Entwicklungen im E-Bus-Markt	13
2.2.2. Strombasierte Treibstoffe für die Schweiz (e-Fuels)	18
2.2.3. Energieeffizienz verschiedener Antriebstechnologien	19
2.3. Best Practices andere Städte / Regionen	20
2.4. Politische Rahmenbedingungen	21
2.5. Folgerungen für die Strategie	22
3. Umsetzung auf Ebene der Transportunternehmen	24
3.1. Randbedingungen und Annahmen	25
3.2. Machbarkeit Depotlader	26
3.3. Flottenentwicklung	29
3.4. Anforderungen Depot-/Werkstattinfrastruktur	31
3.5. IT-Anforderungen	32
3.6. Massnahmenpläne pro Transportunternehmen	32
4. Kostenauswirkungen	33
4.1. Investitionen	33
4.2. Auswirkungen auf die Betriebskosten	37
4.3. Fördermittel	39
4.4. Auswirkungen auf die Abgeltungen	40
4.4.1. Gesamtabgeltungen	40
4.4.2. Mehrabgeltungen für den VVL	43
4.5. Sensitivitäten und Robustheit der Strategie	46
4.6. Risiken	48
5. Nutzen einer fossilfreien Busflotte	51
5.1. Im Fahrbetrieb	51

5.2.	Weitere Massnahmen zur Vermeidung von Treibhausgasen _____	52
6.	Fazit und Umsetzung _____	53
6.1.	Zusammenfassende Erkenntnisse _____	53
6.2.	Genehmigungsprozess für Fahrzeuge und Infrastrukturen _____	54
6.3.	Monitoring der Umstellung auf fossilfreie Busse _____	56
Annex	_____	58
Annex 1: Best Practices in der Schweiz	_____	59
Annex 2: Dezentrale Ladeinfrastrukturen – Positionspapier VVL	_____	61
Annex 3: Genehmigungsprozess für Investitionen	_____	62
Abbildungsverzeichnis	_____	63
Tabellenverzeichnis	_____	64
Glossar	_____	65

Zusammenfassung

Wieso eine Aktualisierung der bisherigen Strategie?

Der Verkehrsverbund Luzern (VVL) erarbeitete vor fünf Jahren die [E-Bus-Strategie 2019](#). Diese Strategie zeigte auf, mit welchen Antriebsoptionen sich die folgende, an die kantonale Klimastrategie angelehnte Vision des VVL umsetzen lässt: Um 2040 fahren im Kanton Luzern nur noch mit erneuerbarer Energie betriebene, energieeffiziente und emissionsarme Busse.

Die Forschung und Entwicklung alternativer Antriebstechnologien zum Dieselbus waren in den letzten Jahren dynamisch. Deshalb liess der VVL seine im Jahr 2019 erarbeitete Strategie aktualisieren. Im Zentrum standen dabei folgende Fragen: Wie und in welchem Zeitraum lässt sich die bestehende Dieselbusflotte vollständig auf fossilfreie Antriebe umstellen? Die Überarbeitung der Strategie erfolgte technologieoffen und unter Berücksichtigung des aktuellen Markt- und Technologiestands sowie der absehbaren Entwicklungen in den nächsten Jahren.

Basierend auf der aktualisierten Strategie wurden zudem die Umsetzungskonzepte auf Ebene der Transportunternehmen erarbeitet. Diese hatten zum Ziel, einerseits die technische Umsetzbarkeit der Strategie nachzuweisen. Andererseits sollen sie den Umsetzungspfad aufzeigen, wie die Vision 2040 erreicht werden kann inkl. Finanzbedarf für die zusätzlichen Abgeltungen als Folge der Umstellung auf eine fossilfreie Busflotte.

Bestehende Strategie hat nach wie vor Gültigkeit

Batteriebusse erfüllen die Prämisse «erneuerbar – effizient – emissionsarm» nach wie vor am besten. Die Erkenntnis, dass der Einsatz von Biotreibstoffen und e-Fuels (darunter auch Wasserstoff) im öffentlichen Busverkehr nicht zweckmässig ist, hat sich weiter verdichtet. Dies vor allem auch, weil sich die Batteriebusse besser als erwartet weiterentwickelt haben. Der Brennstoffzellenbus erfüllt zwar «erneuerbar» und «emissionsarm» ähnlich wie Batteriebusse, ist aber deutlich weniger energieeffizient. Zudem ist Wasserstoff immer noch teuer und wird es künftig auch bleiben. Auch fehlen grössere Referenzprojekte im öffentlichen Verkehr. Und die Brennstoffzellentechnologie ist nicht so erprobt wie Batteriebusse. Grüner Wasserstoff bleibt aber eine wichtige und gute Technologie, die für den Klimaschutz unverzichtbar ist. Sie soll jedoch für Anwendungen eingesetzt werden, in denen eine Elektrifizierung mittels Batterien oder Fahrleitungen technisch nicht machbar ist, wie beispielsweise in der Flug- und Schifffahrt, oder in der Stahlindustrie.

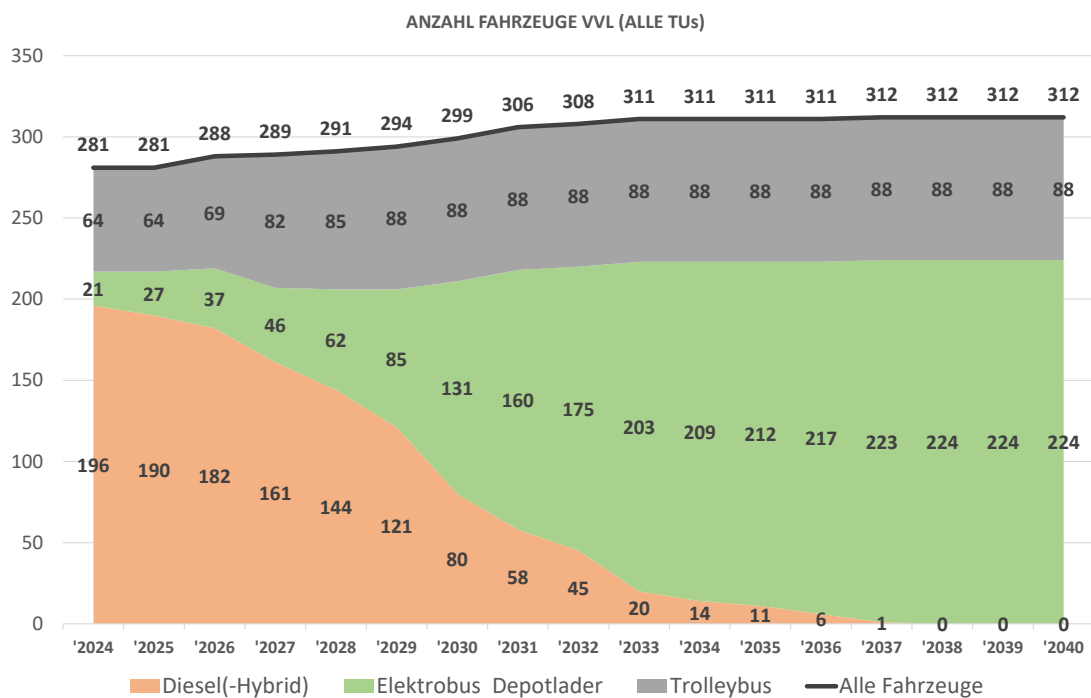
Die im Jahr 2019 eingeschlagene strategische Stossrichtung für eine fossilfreie Busflotte bis 2040 hat weiterhin Gültigkeit. Neben der Weiterentwicklung des Trolleybusnetzes im Raum Luzern soll die Dieselbusflotte im gesamten VVL-Gebiet auf Depotlader-Batteriebusse, die typischerweise im Depot mit 100% erneuerbarem Strom geladen werden, umgestellt werden. Die

Reichweiten von Depotlader-Batteriebussen haben sich in den letzten Jahren verbessert und werden sich gemäss aktuellen Prognosen weiter erhöhen.

Umsetzungskonzepte bestätigen die Machbarkeit und Zielerreichung der Strategie

Die Umsetzungskonzepte auf Ebene der Transportunternehmen bestätigen die technische Machbarkeit. Für die Umstellung des heutigen Angebots auf Batteriebusse sind keine dezentralen Ladeinfrastrukturen erforderlich. Und das Ziel «2040 fossilfrei» ist erreichbar. Gemäss hergeleitetem Elektrifizierungspfad, welcher auf den aktuellen Fahrzeugbeschaffungsplänen basiert, wird der letzte Dieselbus im Jahr 2038 ausser Betrieb genommen.

Abbildung Z-1: Elektrifizierungspfad VVL 2024 bis 2040 (vbl, PAG, ARAG, AAGR, BSF/ZVB)



Die Trolleybusflotte ist nicht Teil des Umsetzungskonzepts. Trotzdem wird diese Teilflotte hier dargestellt, weil in den Jahren 2024 – 2029 Dieselbusse auch auf Trolleybusse umgestellt werden.

Die Umstellung auf Depotlader-Batteriebusse erfordert aus folgenden Gründen zusätzliche Fahrzeuge. Bei sehr langen Tageseinsätzen müssen beim Einsatz von Elektrofahrzeugen mit gegenüber Dieseln limitierten Reichweiten zusätzliche Fahrzeuge eingeplant werden. Zudem sind die heute teilweise knappen Fahrzeugreserven zu erhöhen. Weil Elektrobusse oft

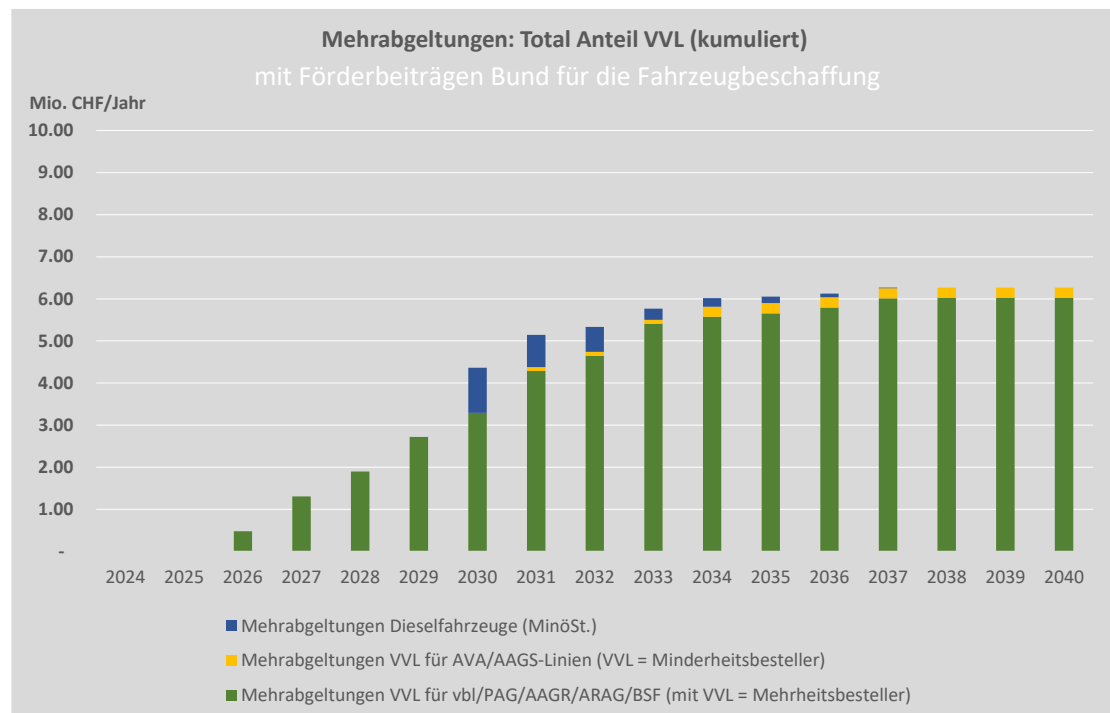
auch tagsüber zwischenladen, stehen sie im Unterschied zu Dieselnbussen weniger für Wartungsarbeiten oder ungeplante Betriebseinsätze, Bahnersatz- oder andere Extraleistungen zur Verfügung. Über den gesamten VVL resultiert ein Mehrbedarf an 26 Fahrzeugen (+13%).

Eine grosse Herausforderung stellt die Elektrifizierung der Depots mit einem grossen Erstinvestitionsvolumen bei praktisch allen TU zwischen 2026 und 2030 dar. Die Transportunternehmen müssen die entsprechenden Projekte rasch konkretisieren und genehmigungsfähige Bau- und Umstellungsprojekte ausarbeiten. Bei mehreren Depotstandorten pro Transportunternehmen ist dazu im Vorfeld die Überprüfung des Status quo bzw. ein Depotkonzept erforderlich. Verzögerungen bei den Ladeinfrastrukturen bzw. Depotumbauten haben starke Auswirkungen auf den vorgesehenen Umstellungspfad bzw. die Fahrzeugbeschaffungen.

Höhere Abgeltungen für den VVL

Finanziell ergibt sich für den VVL ab 2026 ein sukzessiver Anstieg der Abgeltungen; mit Förderbeiträgen des Bundes für die Fahrzeugbeschaffung steigen diese bei vollständiger Umstellung (und heutigem Angebot) auf ca. + 6 Mio. CHF pro Jahr, was einer Zunahme von knapp 20% entspricht. Beiträge aus dem Agglomerationsprogramm für die Ladeinfrastrukturen in den Depots sowie allfällige weitere Fördermittel würden die Mehrabgeltungen reduzieren.

Abbildung Z-2: Mehrabgeltungen VVL (kumuliert) mit Förderbeiträge an die E-Busbeschaffung



Basis: Angebot gemäss Fahrplanjahr 2024; Umstellungen auf Trolleybusse und zusätzlich benötigte Abstellflächen in den Depots sind nicht berücksichtigt.

Erzielbarer Umweltnutzen

Mit einer rein elektrischen Fahrzeugflotte können bei vollständiger Umstellung der Dieselflotten rund 14'000 Tonnen Treibhausgas vermieden werden. Dies entspricht rund 3 Millionen CHF externe Umweltkosten pro Jahr als Nutzen gegenüber den Mehrkosten.

Nebst dem Klimanutzen wirken sich die E-Busse positiv auf die Lärmsituation in den Siedlungsgebieten aus, speziell im Geschwindigkeitsbereich unter 30 km/h sowie in Steigungen. Zudem werden die lokalen Luftschadstoffe markant reduziert.

Verzögerte Umsetzung einer fossilfreien Busflotte birgt Risiken

Eine Verzögerung oder ein vorläufiger Verzicht auf die Umstellung auf eine fossilfreie Busflotte birgt folgende Risiken. Durch die geplante Aufhebung der Mineralölsteuer-Rückerstattung per 2030 verteuert sich der Dieselflottenbetrieb ohne Umweltnutzen. Die Verfügbarkeit von Dieselflotten auf dem Markt wird in den nächsten Jahren zunehmend geringer. Denn verschiedene Fahrzeuglieferanten haben angekündigt ab dem Horizont 2030 keine Dieselflotten mehr zu produzieren. Die im Rahmen der Revision des CO₂-Gesetzes vorgesehenen Fördermittel des Bundes für fossilfreie Antriebe im öffentlichen Busverkehr sind voraussichtlich nur für eine beschränkte Zeitperiode 2026 bis 2030 möglich. Spätere Flottenumstellungen können nicht mehr davon profitieren, was die Gesamtumstellung verteuert. Ein Zuwarten mit der Umstellung auf eine fossilfreie Busflotte bzw. Beschaffungen von weiterhin Dieselflotten könnte im Kontext der Klimadiskussionen die Reputation des VVL und der Transportunternehmen beeinträchtigen. Zudem wäre das im Planungsbericht Klima- und Energiepolitik des Kantons Luzern geforderte Ziel eines fossilfreien ÖV bis 2040 nicht erreichbar. Die Zielerreichung von netto Null 2040 wird unterdessen auch vom Klima- und Innovationsgesetz (KIG), welches im Jahr 2023 angenommen wurde, als Erwartung an die Kantone gerichtet.

1. Einleitung

Der Verkehrsverbund Luzern (VVL) erarbeitete vor fünf Jahren die [E-Bus-Strategie 2019](#). Diese Strategie zeigt auf, mit welchen Antriebsoptionen sich die folgende, an die kantonale Klimastrategie angelehnte Vision des VVL umsetzen lässt: Um 2040 fahren im Kanton Luzern nur noch mit erneuerbarer Energie betriebene, energieeffiziente und emissionsarme Busse.

Der Stand der Wissenschaft und die Entwicklung alternativer Antriebstechnologien zum Dieselbus (z.B. Reichweite der Batterien, Preise und Verfügbarkeit am Markt) waren in den letzten Jahren sehr dynamisch. Deshalb liess der VVL seine im Jahr 2019 erarbeitete Strategie aktualisieren. Im Zentrum standen dabei folgende Fragen: Wie und in welchem Zeitraum lässt sich die bestehende Dieselbusflotte vollständig auf fossilfreie Antriebe umstellen? Die Überarbeitung der Strategie erfolgte technologieoffen und unter Berücksichtigung des aktuellen Markt- und Technologiestands sowie der absehbaren Entwicklungen bis ca. 2040.

Basierend auf der Strategie wurden zudem die Umsetzungskonzepte auf Eben der Transportunternehmen erarbeitet. Diese haben zum Ziel, einerseits die technische Umsetzbarkeit der Strategie nachzuweisen. Andererseits sollen sie den Umsetzungspfad aufzeigen, wie die Vision 2040 erreicht werden kann inkl. Finanzbedarf für Investitionen und Abgeltungen.

In Absprache mit den Transportunternehmen enthält dieser zusammenfassende Gesamtbericht keine TU spezifischen Aussagen. Die detaillierten Umsetzungskonzepte sind in vertraulichen, nicht öffentlichen Teilberichten für jedes Transportunternehmen festgehalten.

2. Überprüfung der Strategie 2019

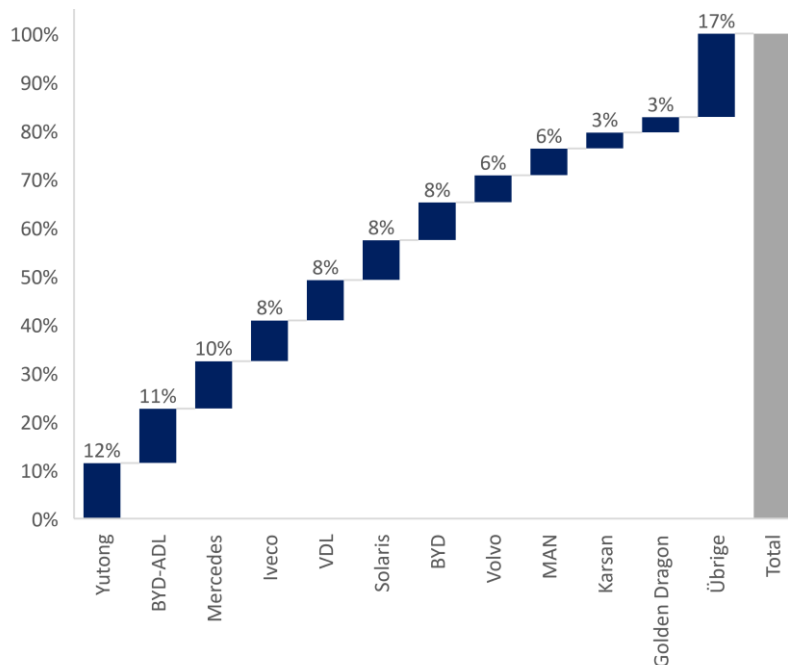
2.1. Marktentwicklung E-Busse und alternative Antriebe

Entwicklung in Europa

Im Jahr 2022 wurden in Europa knapp 4'200 E-Busse neu ausgeliefert; dies entspricht einer Zunahme von +26% gegenüber dem Jahr 2021. Ende 2022 waren damit in Europa 12'600 E-Busse im Einsatz. Bei Stadtbussen lag der Anteil an E-Bussen bei den Neuzulassungen im Jahr 2022 bei 26%. Auch global sind die Zulassungen von E-Bussen stark gestiegen und haben 2022 66'000 Fahrzeuge erreicht. 81% davon wurden in China neu zugelassen. Die Neuzulassungen bei Brennstoffzellenbussen sind im Jahr 2022 zurückgegangen auf ca. 100 Zulassungen (gegenüber knapp 160 im Jahr 2021).

Marktführer ist Yutong mit 12% der Verkäufe im 2022. BYD-ADL¹ und Mercedes folgen mit 11% resp. 10%. Im Gegensatz zum Diesel-Markt ist der E-Bus-Markt in Europa deutlich vielfältiger. Neue Marktakteure bieten oft nur noch E-Busse an.

Abbildung 1: Europäische E-Bus-Marktführer in Europa



Quelle: <https://www.sustainable-bus.com/news/electric-bus-market-europe-2022>

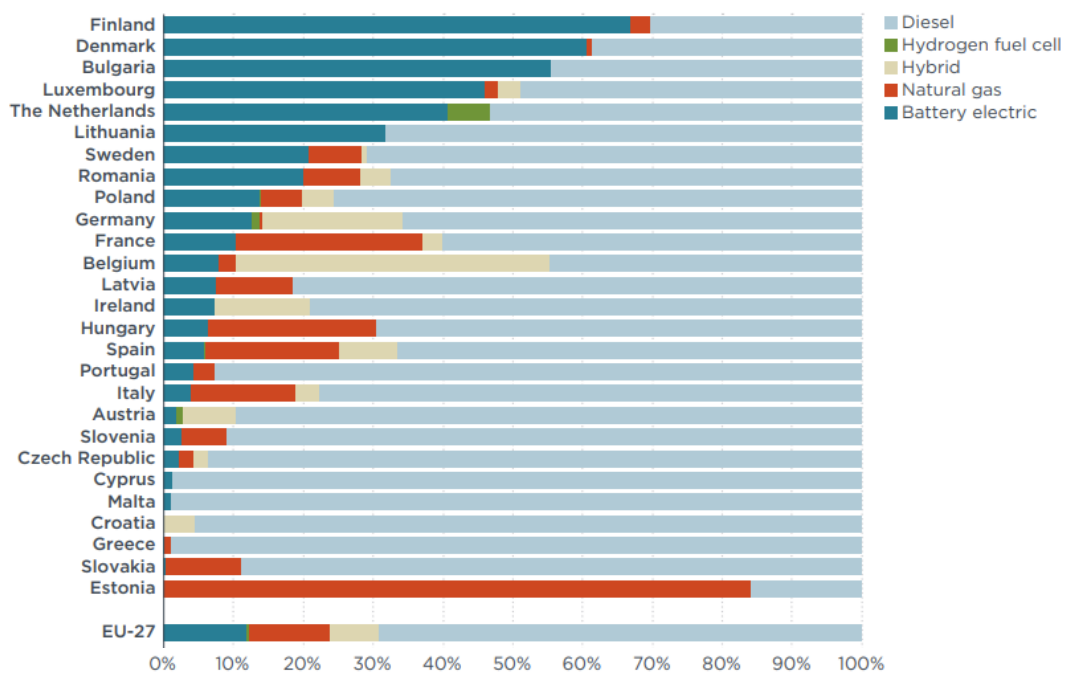
¹ Partnerschaft Alexander Dennis Limited (ADL) und BYD UK: Der führende britische Hersteller von Elektrobussen wird im Rahmen ihrer Partnerschaft über 130 emissionsfreie Doppeldeckerbusse an den Busbetreiber National Express liefern.

Im Jahr 2022 waren in der ganzen EU insgesamt 13% aller verkauften Busse emissionsfrei. Die Mitgliedstaaten führen emissionsfreie Busse mit unterschiedlichem Tempo ein. Finnland, Dänemark und Bulgarien setzen mehrheitlich auf batterieelektrische Antriebe.

Die meisten Brennstoffzellenbusse wurden in den Niederlanden zugelassen, eine kleine Menge in Deutschland, Österreich und Polen. Insgesamt ist der Anteil Brennstoffzellenbusse mit 1% des gesamten Markts sehr klein. Einige Mitgliedstaaten investieren weiterhin in Erdgas-technologien (Frankreich, Spanien, Italien).

In der EU wurden im ersten Halbjahr 2023 zum ersten Mal mehr Elektrobusse als reine Dieselsebusse für den Linienverkehr verkauft.

Abbildung 2: Verkaufsanteil emissionsfreier Busse 2022 in der EU

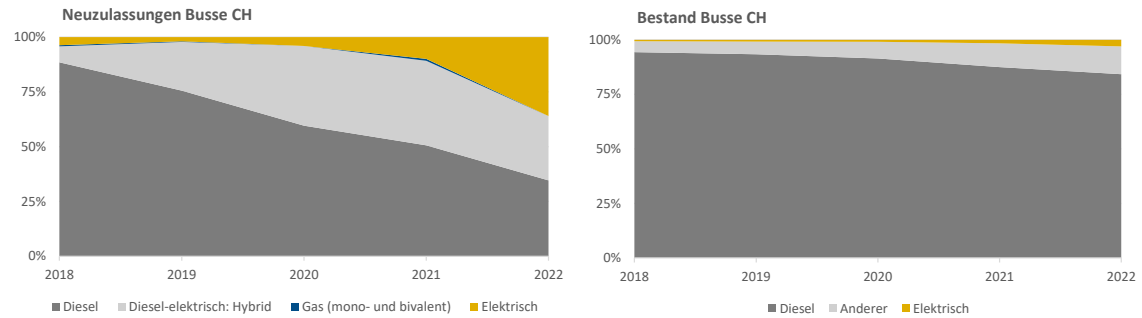


Quelle: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/08/EU-HDV-truck-market-update-fact-sheet-for-posting.pdf>

Entwicklung in der Schweiz

Der Anteil Batteriebusse bei den Neuzulassungen war im Jahr 2022 in der Schweiz stark gestiegen und machte bereits 36% aus. Die Schweiz befindet sich damit im oberen Mittelfeld in Europa. In der Schweiz spielen Hess, EvoBus (Mercedes) und MAN eine wichtige Rolle. Der Bestand an E-Bussen in der Schweiz ist immer noch gering und betrug im Jahr 2022 3% der Gesamtflotte. Dieselsebusse hatten im Jahr 2022 immer noch einen Anteil von 84% bezogen auf die gesamte Busflotte.

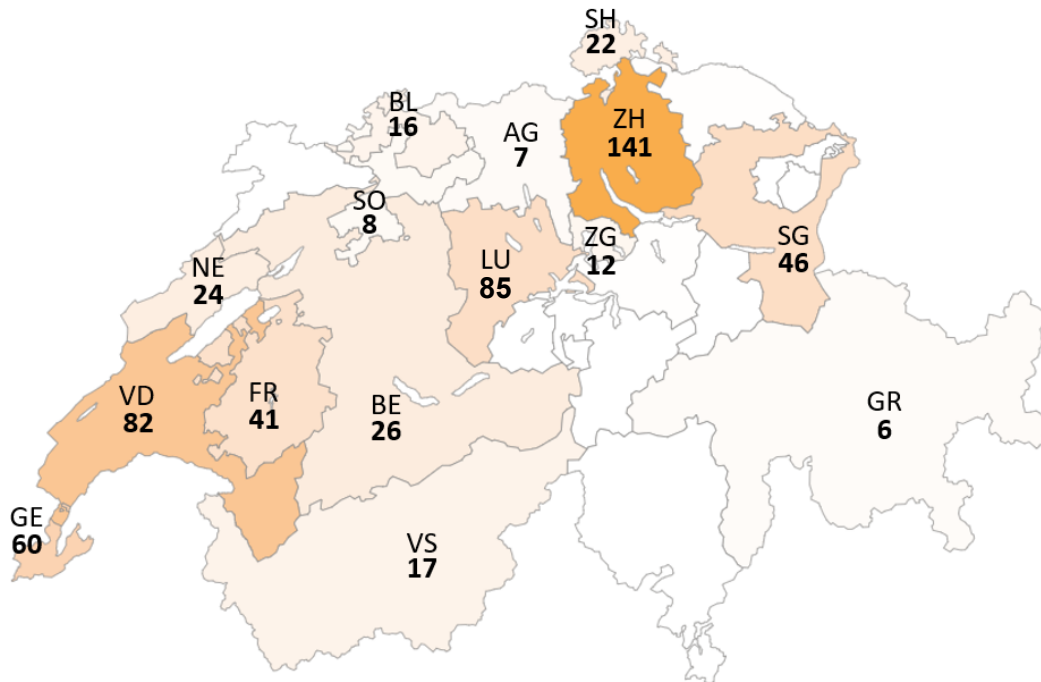
Abbildung 3: Entwicklung Neuzulassungen und Bestand von Batteriebusen in der Schweiz



Grafik INFRAS/OGS. Quelle: BFS

Derzeit sind in der Schweiz 9'800 Busse registriert (Stand März 2023). Davon sind knapp 600 Busse voll elektrisch angetrieben. 321 Elektrobusse fahren an Oberleitungen (Gelenk- und Doppelgelenktrolleybusse). Beim Rest handelt es sich um Batteriebusse (165 Standardbusse und 105 Gelenkbusse). 24 % der Elektrobusse im Bestand wurden 2022 und später in Verkehr gesetzt. Wasserstoffbusse sind zurzeit keine registriert.

Abbildung 4: Anzahl registrierte Elektrobusse inkl. Trolleybusse in der Schweiz, März 2023



Grafik INFRAS/OGS. Quelle: IVZ - Informationssystem Verkehrszulassung

Rolle aussereuropäischer Hersteller für den Schweizer Markt

EU-Bushersteller liefern heute zwei Drittel der neuen Elektrobusse in die EU. China machte im Jahr 2022 rund ein Drittel der Zulassungen aus. Eine wichtige Voraussetzung für die Lieferung von Bussen in die Schweiz ist ein Service-Netz bzw. After-Sales-Support in der Schweiz. Dieses Kriterium schliesst kurz- bis mittelfristig die meisten aussereuropäischen Hersteller aus. Weitere Fragezeichen bestehen zurzeit auch bzgl. Qualität bzw. Zuverlässigkeit. Hinzu kommt, dass es sich in der Schweiz um einen kleinräumigen, verzettelten Markt handelt. Aussereuropäische Hersteller können in dieser Situation mit kleinen Beschaffungslosen keine konkurrenzfähigen Preise anbieten (anders als z.B. in den Niederlanden oder Belgien, wo jeweils mehrere hundert Fahrzeuge beschafft werden).

Längerfristig werden sich einige aussereuropäische Anbieter in der EU durchsetzen bzw. etablieren, wobei die heute dominierenden EU-Hersteller auch längerfristig die Hauptrolle spielen werden.

2.2. Technologieentwicklung

2.2.1. Technische Entwicklungen im E-Bus-Markt

Ladekonzepte

Für das Laden der E-Busse bestehen verschiedene Ladekonzepte (vgl. Abbildung 5). Die sogenannten Gelegenheitslader sind mit kleinen Batterien ausgerüstet und laden diese mehrmals täglich über Ladeinfrastrukturen entlang der Linie nach. Dies geschieht entweder *statisch* über stationäre Ladestationen oder *dynamisch* über eine Fahrleitung. Der *Depotlader* verfügt über eine grosse, mehrere Tonnen schwere Batterie, die er im Depot (typischerweise über Nacht) lädt. Beim *Kombilader* handelt es sich ebenfalls um einen Depotlader mit grosser Batterie, der jedoch zusätzlich über dezentrale Ladeinfrastruktur auf dem Liniennetz nachlädt.

Abbildung 5: Ladekonzepte für Batteriebusse

<p>Depotlader <i>Stationäres Laden/Nachladen im Depot</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grosse, energieoptimierte Batterie (max. 3 – 3.5 t bei 12 m Bus) ▪ Reichweite 12 m-Bus pro Ladung: heute ca. 190 km, längerfristig bis 400 km ▪ Ladeleistung im Depot i.d.R. mit 150 kW ▪ Ladedauer 3-5 h nachts (je nach Einsatzlänge) 	<p>Kombilader <i>Kombination der Konzept Depot- und Gelegenheitslader</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grosse, energieoptimierte Batterie ▪ Stationäres Laden im Depot plus Nachladen an Endhaltestellen ▪ Grosse Reichweite bereits heute möglich (bei genügend Ladezeit an Endhaltestellen) 	<p>Gelegenheitslader statisch <i>Stationäres Laden an End-/Zwischenstationen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kleine, leistungsoptimierte Batterie (< 1 t) ▪ Reichweite pro Ladung ca. 30 km ▪ Ladeleistung 450/600 kW ▪ Ladedauer: i.d.R. 3-5 Min. (abhängig von Linienlänge) 	<p>Gelegenheitslader dynamisch <i>Laden über Fahrleitung (Batterietrolleybus oder IMC)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Kleine, leistungsoptimierte Batterie (< 1 t) ▪ Elektrifizierter Streckenanteil von 50 – 60% ▪ Ladeleistung 120 kW
---	---	--	--

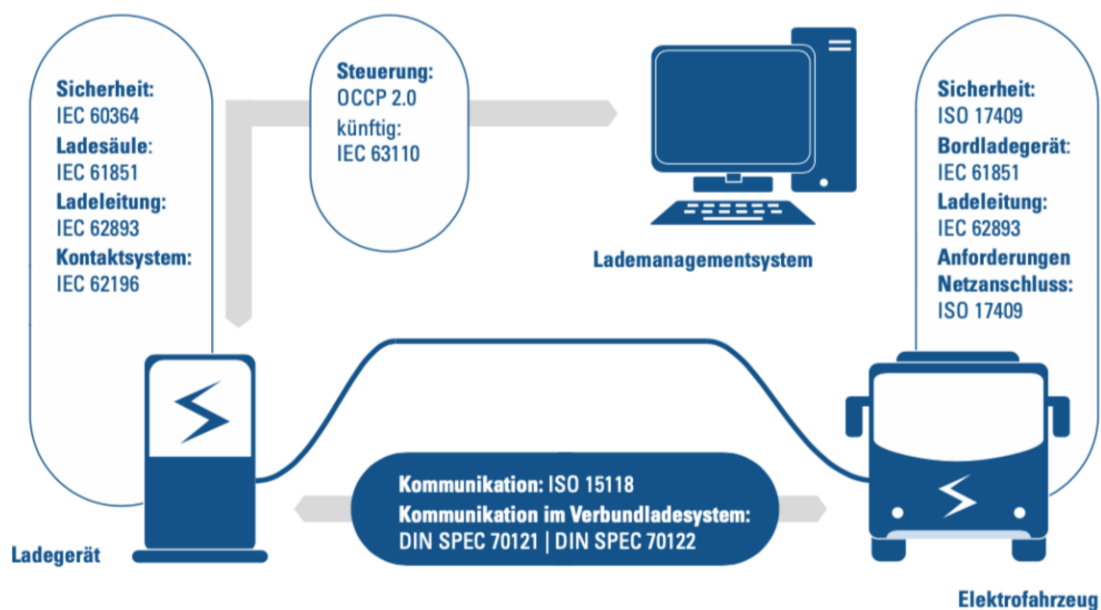
Grafik INFRAS/OGS.

Die ersten Elektrobus-Projekte wurden vorwiegend als Gelegenheitslader mit kleinen, leistungsoptimierten Batterien und Ladeinfrastruktur an End- und/oder einzelnen Zwischenhaltestellen entlang der Strecke ausgeführt. Seit einiger Zeit setzen die Transportunternehmen vermehrt auf Depotlader. Verantwortlich dafür ist der technologische Fortschritt bei den Batterien, der zu einer deutlichen Steigerung der Reichweiten pro Ladung führt. Heute dominieren sowohl im europäischen Raum als auch in der Schweiz immer mehr E-Busse mit grossen Batterien, die ausschliesslich im Depot laden (sog. Depotlader). In Deutschland liegt der Anteil Depotlader bei rund 70% bezogen auf die aktuelle E-Busflotte. Für anspruchsvolle Strecken mit sehr langen Tageseinsätzen, für welche die aktuellen Reichweiten ohne Nachladen (noch) nicht ausreichen, kommt zudem der Kombilader (Depotlader, der auch auf der Strecke nachlädt) zum Einsatz. In Städten mit bereits vorhandenen Fahrleitungen werden auch die Trolleybus-Systeme weiterentwickelt, sowohl in der Schweiz als auch vielerorts in Europa (z. Bsp. Solingen, Esslingen, Salzburg, Arnhem, Prag, Danzig).

Ladetechnologien

Die gängigsten Lademöglichkeiten sind Steckerladung mit CCS Combo 2 sowie Dachladung über einen Pantographen. Die ÖV-Branche hat die Steckerladung als Minimalstandard für den interoperablen Betrieb definiert. Der Stecker wird vor allem für Ladungen im Depot eingesetzt, könnte aber auch für dezentrale Ladestationen verwendet werden. Die Ladeleitung ist auf maximal 150 kW limitiert. Abbildung 6 zeigt die dazu geschaffenen Normen zur Standardisierung.

Abbildung 6: Übersicht Standardisierung für das konduktive Laden über Plug-In-System



Quelle: Quelle: NOW Abschlussbericht Innovative Antriebssysteme, 08.2021

Das Gelegenheitsladen unterwegs erfolgt i.d.R. über einen Pantographen, der Ladeleistungen bis zu 600 kW ermöglicht. Für Pantograph-Lösungen gibt es zwei Technologien: Pantograph «up» (auf dem Fahrzeugdach montiert, erhebt sich zu den Lademasten) und Pantograph «down» (an einem Masten montiert, senkt sich zum Fahrzeug). In der Schweiz werden beide Systeme (Panto-up und Panto-down) zu ca. 50% bei den verschiedenen TU eingesetzt. Lösungen mit Pantographen kommen auch bei Depotlader-Konzepten vor und sind vor allem im Hinblick auf automatisierte Abläufe in den Betriebshöfen interessant.

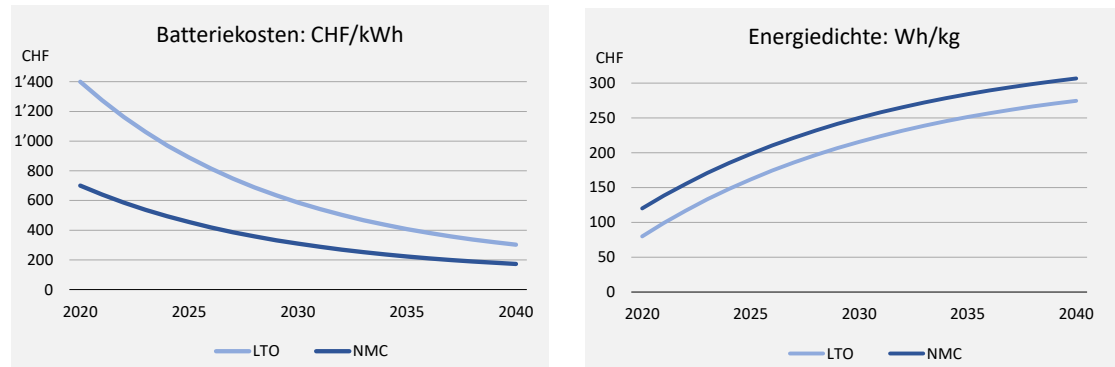
Es bestehen auch noch andere, weniger verbreitete Ladetechnologien, wie z.B. die Seitendocking-Station, induktives Laden oder das Grid-eMotion Flash (TOSA-System), die jedoch selten eingesetzt werden.

Entwicklungen der Batterien

Die Entwicklung der Batterien erfolgte in den letzten Jahren sehr dynamisch und wird weiter vorangehen. Einerseits nimmt die Energiedichte (Wh/kg) und damit die Reichweite laufend zu. Die in den nächsten 10 bis 15 Jahren erwarteten Energiedichten werden deutlich höher liegen als noch in der Strategie 2019 angenommen (vgl. Abbildung 7, rechts). Neben der Weiterentwicklung der altbewährten Lithium-Ionen-Batterien, versprechen auch neue Technologien wie Feststoffbatterien, Silizium-Anoden-Batterien oder LMNO-Batterien eine höhere Energiedichte.

Energieoptimierte Batterien, wie sie bei den Depotladerbussen verbaut werden, sind pro Speicherkapazität deutlich günstiger als die leistungsoptimierten Batterien bei den Gelegenheitsladern. Für beide Typen werden in den nächsten 10-15 Jahren spürbare Preissenkungen (CHF/kWh) erwartet. Abbildung 7 (links) zeigt die erwarteten Entwicklungen bis 2040 aufgrund aktueller Prognosen. Es gilt zu bemerken, dass Batterien für Busse deutlich teurer als für PKW sind. Der deutliche Preisunterschied liegt hauptsächlich im aufwändigeren Batteriemangement- und Kühlsystem. Zudem werden Busbatterien auch künftig in deutlich geringeren Mengen als im PW-Bereich hergestellt. Folglich spielt der Skaleneffekt nicht in gleichem Masse.

Abbildung 7: Entwicklung Kosten und Energiedichten von Batterien

**Bemerkung:**

Es ist zu beachten, dass Batterien für schwere Nutzfahrzeuge (SNF) deutlich teurer sind als Batterien für Elektro-Pkw (oder stationäre Batterien).

Depotlader-Batterien (NMC)

⇒ energieoptimiert (pro Batteriegewicht viel Energie speichern)

Gelegenheitslader-Batterien (Titanate, LTO)

⇒ leistungsoptimiert (hohe Energie pro Zeit aufnehmen oder abgeben)

Vergleich mit Prognose 2019:

keine wesentliche Veränderung

Vergleich mit Prognose 2019:

klare Erhöhung der Energiedichten bis 2040 zu erwarten (Prognose 2019: zwischen 190 und 260 Wh/kg)

Grafik INFRAS/OGS. Quelle: E-Bus-Tool INFRAS

Entwicklung der Reichweiten

Die Reichweite hängt von zwei Faktoren ab: der Batteriekapazität (bzw. wieviel Energie auf die Batterien geladen und davon genutzt werden kann) und dem durchschnittlichen Energieverbrauch pro km, einschliesslich dem Energieaufwand für das Heizen, Lüften und Kühlen des Innenraums sowie für die diversen Bordgeräte und Monitore.

Die **Batteriekapazität** setzt sich aus dem Gewicht der Batterien und der Energiedichte zusammen. Aufgrund des technologischen Fortschritts nimmt die Kapazität mit der Zeit zu, was bedeutet, dass ein heute beschaffter Bus eine deutlich geringere Reichweite hat als beispielsweise ein in den Jahren 2027 bis 2030 beschaffter Bus. Die für die Strategie und die darauf aufbauenden Umsetzungskonzepte für die einzelnen Transportunternehmen (vgl. Kapitel 3) angenommenen Batteriekapazitäten sind aus der Tabelle 1 ersichtlich. Für den eigentlichen Fahrbetrieb können nicht 100% der Brutto-Energiekapazität einer 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. Die für den Fahrbetrieb **nutzbare Kapazität** inkl. Heizung, Lüftung und Klima (HLK) sowie Betrieb weitere Nebenaggregate wie Bordcomputer und Bildschirme liegt deshalb bei **maximal 70%**.

Tabelle 1: Annahmen zu Batteriekapazitäten im Jahr 2023

Bustyp	Bruttokapazität (100%)	Nutzbare Kapazität (70%)	Bemerkung
Standardbus (12m)	500 kWh	350 kWh	Ein auf dem Fahrzeugdach montierter Pantograph reduziert die Batteriekapazität je nach Hersteller um bis zu 15%, weil weniger Platz für das Verbauen von Batteriezellen vorhanden ist.
Gelenkbus (18m)	670 kWh	470 kWh	

Tabelle INFRAS/OGS. Quelle: INFRAS E-Bus-Tool bzw. Hersteller-Angaben an der VDV-Elektrobuskonferenz in Berlin 2023

Die folgende Tabelle zeigt die Annahmen zum spezifischen Energieverbrauch. Für die Dimensionierung der Reichweiten ist nicht der durchschnittliche, jährliche Verbrauch, sondern der Spitzenverbrauch an kalten Wintertagen (Zusatzheizung) bzw. heißen Sommertagen (Klimaanlage) heranzuziehen. Dieser Spitzenverbrauch kann bis zu 25% über dem Durchschnittsverbrauch liegen.

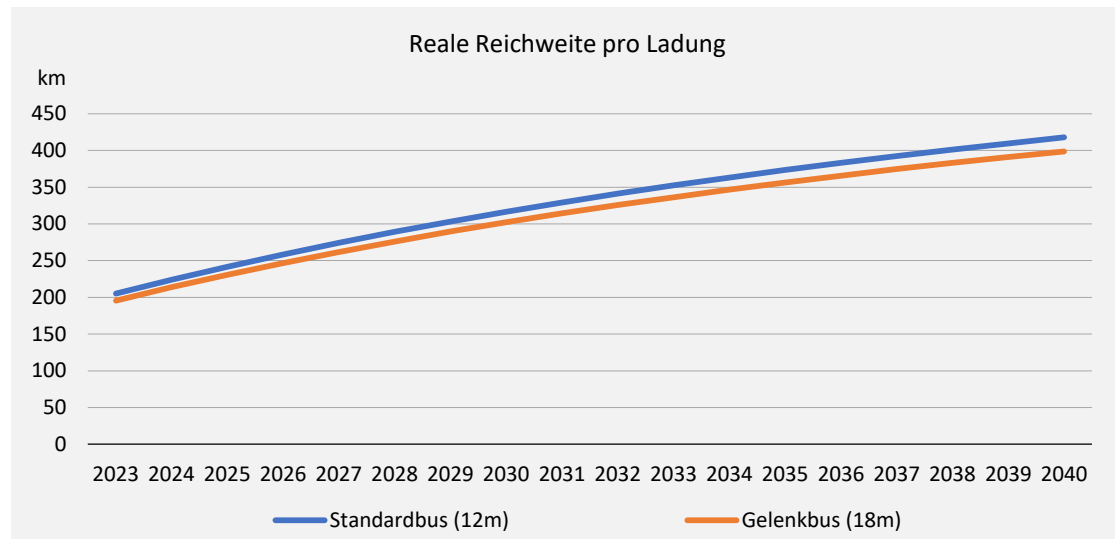
Tabelle 2: Annahmen zum spezifischen Energieverbrauch pro km im Jahr 2023

Bustyp	Durchschnitts- verbrauch	Spitzen- verbrauch	Bemerkungen
Standardbus (12m)			Spitzenverbrauch 25% höher als Durchschnittsverbrauch.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Regionalverkehr ▪ Stadtverkehr 	1.40 kWh/km 1.55 kWh/km	1.75 kWh/km 1.90 kWh/km	Stadtverkehr mit ca. 15% höherem Energieverbrauch pro km als Regionalverkehr.
Gelenkbus (18)			Der spezifische Energieverbrauch dürfte sich in den nächsten Jahren dank leichtem Chassis sowie effizienteren HLK- und Batterieheizsystem verbessern.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Regionalverkehr ▪ Stadtverkehr 	1.90 kWh/km 2.25 kWh/km	2.40 kWh/km 2.80 kWh/km	

Tabelle INFRAS/OGS. Quelle: INFRAS E-Bus-Tool bzw. Erfahrungswerte der Transportunternehmen

Mit diesen Annahmen werden sich – zusammen mit den absehbaren Verbesserungen bei den Energiedichten der Batterien – die Reichweiten von Depotlader Bussen weiterentwickeln (vgl. Abbildung 8). Damit erreicht ein Gelenkbus dank der grösseren Batterie trotz eines höheren Energieverbrauchs eine ähnliche Reichweite wie ein Standardbus

Abbildung 8: Angenommene Entwicklung der Reichweite von Standard- und Gelenkbussen

**Annahmen:**

- Durchschnittlicher Energieverbrauch (2023): Standardbus (12m): 1.4 kWh/km, Gelenkbus (18m): 1.9 kWh/km
- HLK vollständig über Batterie mit Zuschlagsfaktor 1.25 berücksichtigt
- Nutzbare Batteriekapazität für Betrieb: 70%
- Batteriegrößen brutto (mit aktuellen Werten 2023 geeicht): ca. 500 kWh Standardbus, 670 kWh Gelenkbus

Vergleich Prognose 2019:

Erhöhung der Reichweiten bis 2035 aufgrund von besseren Energiedichten.

Entwicklung bei den 12m-Bussen langsamer, bei 18m-Bussen schneller als damals prognostiziert

Grafik INFRAS/OGS. Quelle: INFRAS E-Bus-Tool

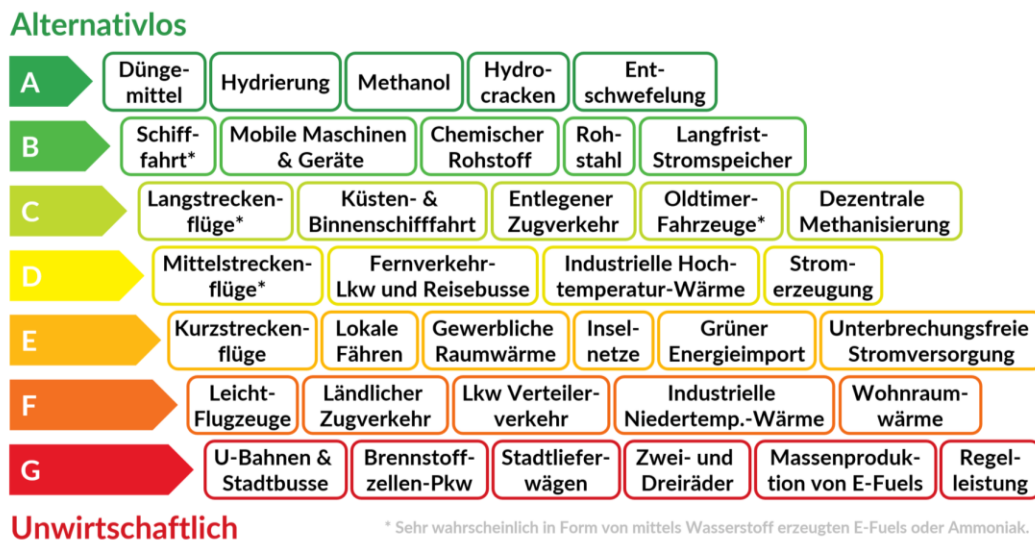
2.2.2. Strombasierte Treibstoffe für die Schweiz (e-Fuels)

Zu den strombasierten Treibstoffen, auch e-Fuels genannt, gehören Wasserstoff (H₂) sowie Power-to-Liquid-Treibstoffe (PtL = synthetische Treibstoffe). Sie sind aus Marktsicht wie folgt einzuordnen:

- Wasserstoff ist günstiger als PtL.
- Bis 2030 ist Wasserstoff in geringen Mengen in der Schweiz verfügbar, jedoch kaum PtL.
- Bis 2040 dürfte Wasserstoff global in grösseren Mengen verfügbar sein.
- Auch PtL wird bis 2040 im globalen Markt verfügbar sein. Hauptabnehmer dürfte u.a. die Luftfahrt sein (vgl. Abbildung 9).
- Kosten für H₂ und PtL bleiben auch bis 2050 hoch.
- H₂ und PtL für die Schweiz dürfte v.a. in der MENA Region (Nahost und Nordafrika) produziert werden. Gegebenenfalls könnte auch Island (mit Geothermie) ein Anbieter werden. Potenzial allerdings sehr überschaubar.
- Abhängigkeit / Versorgungsrisiken vergleichbar mit fossilen Treibstoffen heute.

Grüner Wasserstoff bleibt eine wichtige und gute Technologie, die im Zusammenhang mit der Klimadiskussion unverzichtbar ist. Sie soll jedoch für Anwendungen eingesetzt werden, in denen eine volle Elektrifizierung mittels Batterien oder Fahrleitungen technisch nicht machbar ist, wie beispielsweise in der Luft- und Schifffahrt, für den langfristigen Energiespeicher oder in der Stahlindustrie. Auch für den Transport von schwerer Ladung über weite Strecken kann Wasserstoff in naher Zukunft mehr zum Einsatz kommen.

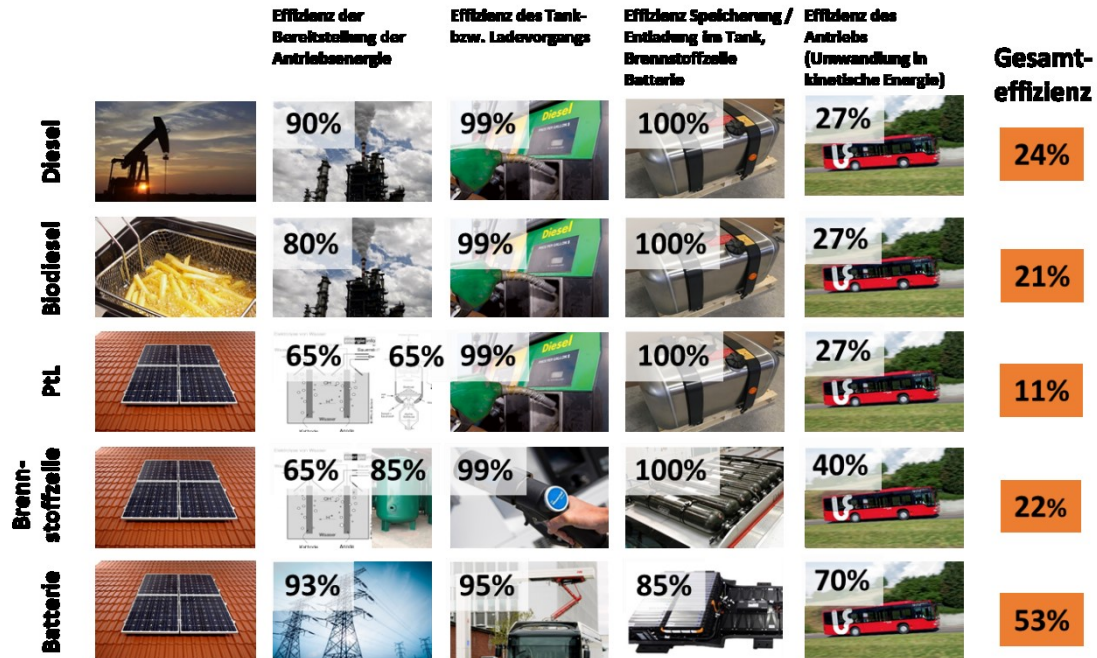
Abbildung 9: Einsatzbereiche sauberen Wasserstoffs



Quelle: M. Liebreich, 2021

2.2.3. Energieeffizienz verschiedener Antriebstechnologien

Wenn man die Gesamteffizienz der Antriebsoptionen direkt gegenüberstellt, lässt sich eine Rangfolge der Antriebsoptionen erstellen (vgl. Abbildung 10): Elektroantriebe sind generell viel effizienter als Verbrennungsmotoren; gut 50% der Primärenergie fließt in die Fortbewegung. Brennstoffzellenfahrzeuge sind 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 (Biomass to liquid; BtL) oder Strom (Power to liquid; PtL) der Fall ist – wird die Gesamteffizienz sehr tief.

Abbildung 10: Energieeffizienz verschiedener Treibstoff- bzw. Antriebsoptionen (Well-to-Wheel²)

Grafik INFRAS/OGS. Bemerkung: Die Gesamteffizienz errechnet sich durch die Multiplikation der Teileffizienz der Teilprozesse; Beispiel Diesel: $100\% * 90\% * 99\% * 100\% * 27\% = 24\%$. Quelle: Eigene Bearbeitung INFRAS basierend auf PSI (2021), Does Size Matter? The Influence of Size, Load Factor, Range Autonomy, and Application Type on the Life Cycle Assessment of Current and Future Medium- and Heavy-Duty Vehicles, <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.0c07773>

2.3. Best Practices andere Städte / Regionen












In der Schweiz kommen – zusätzlich zu den Trolleybussen – bis anhin sowohl Depotlader, Kombilader und Gelegenheitslader zum Einsatz (vgl. Abbildung 11). Tendenz: Depotlader setzen sich vermehrt durch, u.a. dank höherer Reichweite und Flexibilität.

Wasserstoffbusse werden zurzeit kaum eingesetzt. In Luzern wurde kürzlich die Technologie getestet, aber bisher aufgrund der hohen Kosten und der mangelhaften Verfügbarkeit grünen Wasserstoffs nicht weiterverfolgt. Und in Wiesbaden (D) wurden kürzlich die zehn angeschafften Wasserstoffbusse bereits nach einem Einsatzjahr wieder aus dem Verkehr genommen. Die städtische Verkehrsgesellschaft hatte sich in "Abwägung aller Argumente" bewusst

² Betrachtungsmethode (wörtlich: «vom Bohrloch bis zum Rad»): Dabei wird die gesamte Wirkungskette für die Fortbewegung von der Gewinnung und Bereitstellung der Antriebsenergie bis zur Umwandlung in kinetische Energie untersucht. Somit ist der Energiebedarf z.B. zur Herstellung des Fahrzeugs, der Betankungsanlagen, der Brennstoffzellen oder der Batterien nicht inkludiert.

dazu entschieden, bei einer Neuausrichtung der Fuhrpark-Strategie auf die Wasserstoffbusse zu verzichten.³

Abbildung 11: Überblick Best Practices in der Schweiz

	Depotlader	Kombilader	Gelegenheitslader
Postauto AG			
BVB			
VBSH			
VBSG			
VBZ			
Bernmobil			
TPG			

Im Annex finden sich zu diesen Best Practices-Beispielen Detailinformationen.

Grafik INFRAS/OGS.

2.4. Politische Rahmenbedingungen

Bundesebene

- Klimaziel und Energiestrategie öV 2050: Die langfristige Klimastrategie des Bundes ist ein wichtiger Schritt in Richtung des Netto-Null-Ziels. Sie stützt sich weitgehend auf die Energieperspektiven 2050+ des Bundesamtes für Energie. Ein Drittel des gesamten Energieverbrauchs in der Schweiz entfällt auf den Verkehr. Er stellt deshalb einen Schwerpunkt in der Energiestrategie 2050 dar, mit welcher der Bundesrat u.a. schrittweise aus der Kernenergie aussteigen will. Die Strategie sieht zudem vor, dass der Verkehrsbereich bis 2050 seinen Energieverbrauch um 50% senkt. Das Bundesamt für Verkehr (BAV) hat deshalb den Auftrag erhalten, die Energiestrategie des Bundesrates in seinem Zuständigkeitsbereich zu konkretisieren. Zu diesem Zweck hat das BAV das Programm «Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)» lanciert, mit folgenden Zielen:
 - Steigerung der Energieeffizienz
 - Ausstieg aus der Kernenergie
 - Senkung des CO₂-Ausstosses
 - Produktion erneuerbarer Energie

³ <https://www.hessenschau.de/wirtschaft/wiesbaden-schafft-wasserstoffbusse-ab---und-kauft-dieselbusse-v4,wasserstoff-busse-wiesbaden-100.html>

- Revidiertes CO₂-Gesetz des Bundes (noch nicht verabschiedet):
 - Abschaffung der Mineralölsteuerrückerstattung ab 2030 (gemäss aktuellem Stand)
 - Bundesfinanzierung der Mehrkosten von fossilfreien Bussen (nach Abzug der übrigen Fördergelder) von 2026 bis 2030: im RPV 75% der Mehrkosten, im Ortsverkehr 30%.
- Agglomerationsprogramme: Mitfinanzierung für Ladeinfrastrukturen

Kantonebene

Der Planungsbericht Klima- und Energiepolitik des Kantons Luzern (2021) inkl. Massnahmen- und Umsetzungsplanung 2022-2026 verfolgt das Ziel eines fossilfreien Verkehrs bis 2040. Dabei soll der ÖV eine Vorbildrolle übernehmen.

2.5. Folgerungen für die Strategie

Erkenntnisse aus der Analyse zur aktuellen Marktsituation und zum Technologiestand

Batteriebusse erfüllen die Prämisse «erneuerbar – effizient – emissionsarm» nach wie vor am besten. Die Batteriebusse haben sich entsprechend der Prognosen 2019 weiterentwickelt. Und die Reichweiten werden sich gemäss aktuellen Prognosen weiter erhöhen.

Die Erkenntnis, dass der Einsatz von Biotreibstoffen und e-Fuels im öffentlichen Busverkehr nicht zweckmässig ist, hat sich weiter verdichtet. Der Brennstoffzellenbus erfüllt zwar «erneuerbar» und «emissionsarm» ähnlich wie Batteriebusse, ist aber deutlich weniger energieeffizient. Zudem ist Wasserstoff immer noch teuer und wird es künftig auch bleiben. Auch fehlen grössere Referenzprojekte im öffentlichen Verkehr. Die Technologie ist nicht so erprobt wie Batteriebusse. Grüner Wasserstoff bleibt aber eine wichtige und gute Technologie, die im Zusammenhang mit der Klimadiskussion unverzichtbar ist. Sie soll jedoch für Anwendungen eingesetzt werden, in denen eine volle Elektrifizierung mittels Batterien oder Fahrleitungen technisch nicht machbar ist, wie beispielsweise in der Flug- und Schifffahrt, oder in der Stahlindustrie.

Verbrennungsmotoren mit Bio-Treibstoffen oder synthetischen Treibstoffen (e-Fuels) sind und bleiben ungenügend bei der Energieeffizienz und den lokalen Emissionen (Luftschadstoffe v.a. Stickoxide und Lärm). Potenzial und Verfügbarkeit sind zudem sehr überschaubar.

Bestehende Strategie hat nach wie vor Gültigkeit

Die Entwicklungen der letzten Jahre sowie die aktualisierten Prognosen bestätigen, dass für die Dekarbonisierung der Busflotten im Kanton Luzern Batteriebusse in Form von Depotladern vor-

zusehen sind: **Batteriebusse mit grossen Batterien, die typischerweise im Depot mit 100% erneuerbarem Strom geladen werden.** Zur Erhöhung der betrieblichen Flexibilität können zusätzlich dezentrale Ladestationen beispielsweise an Busknoten bzw. an Bahnhöfen vorgesehen werden. Zudem soll das städtische Trolleybusnetz weiterentwickelt werden, denn die Batterie-trolleybusse können heutzutage auch längere fahrleitungslose Streckenabschnitte befahren, was die Flexibilität des Trolleybussystems markant erhöht.

Umsetzung der Depotlader-Strategie auf Ebene der Transportunternehmen

Die Umsetzung der bestätigten Depotlader-Strategie wurde auf Ebene der einzelnen Transportunternehmen geprüft, wobei folgende Hauptfragen zu klären waren:

- Ist die Elektrifizierung der Gesamtflotte mit Depotlader-Batteriebussen machbar?
- Sind hierfür zusätzliche Busse erforderlich?
- Sind allenfalls zusätzlich dezentrale Ladeinfrastrukturen auf den Linien erforderlich (Kombilader-Ansatz)?
- Welche Anforderungen resultieren für die Lade- bzw. Stromversorgung in den Depots?
- Welche Mehrkosten und Mehrabgeltungen entstehen gegenüber dem Dieselbusbetrieb?

Die Ergebnisse dieser Überprüfung sind in den Kapiteln 3 und 4 zusammengefasst.

3. Umsetzung auf Ebene der Transportunternehmen

Die Umsetzung der Strategie zu einem fossilfreien öffentlichen Busverkehr erfolgt bei den konzeptionierten Transportunternehmen des Kantons Luzern, für welche der VVL als Hauptbesteller auftritt:

- vbl
- PAG
- ARAG
- AAGR
- BSF (ZVB)

Weitere vom VVL mitfinanzierte Buslinien liegen in den Räumen Zofingen (betrieben durch die AVA) und Küssnacht (betrieben durch die AAGS). Die Umstellung zu fossilfreiem Betrieb bei diesen beiden Transportunternehmen erfolgt auf Basis der Strategien der jeweiligen Hauptbesteller Kanton Aargau bzw. Kanton Schwyz. Die finanziellen Auswirkungen der Elektrifizierung dieser Linien werden nicht im Einzelnen vorgestellt, sondern in Analogie zu den durchschnittlich prognostizierten Mehrabgeltungen im Kanton Luzern nur in ihrer finanziellen Dimension berücksichtigt (vgl. dazu Kap. 4.4).

Mit den oben erwähnten 5 Transportunternehmen wurden vertiefte Gespräche geführt mit dem Ziel, die vollständige Elektrifizierung ihrer Busflotten zu planen, die notwendigen Massnahmen abzuleiten und vor allem die finanziellen Auswirkungen aus der Elektrifizierung zu bestimmen. Für jedes Transportunternehmen wurde ein eigener, vertraulicher Teilbericht erstellt. Im vorliegenden Gesamtbericht werden die Resultate deshalb nur summarisch und ohne Angaben zu einzelnen Transportunternehmen zusammengefasst.

In enger Zusammenarbeit mit den Transportunternehmen wurden die TU spezifischen «Elektrifizierungspfade» festgelegt, also die notwendigen Veränderungen im Fahrzeugpark und der Ablauf der entsprechenden Umstellungen. Das Resultat besteht aus einigen Zwischenschritten, welche in den nächsten Kapiteln summarisch für alle Transportunternehmen vorgestellt werden:

- Feststellen der Randbedingungen
- Machbarkeit der Elektrifizierung auf Basis der Depotladung
- Flottenentwicklung hin zur vollständigen Elektrifizierung
- Anforderungen an die Infrastrukturen und an die IT-Umgebung
- Weitere Anforderungen/Veränderungen
- Kostenauswirkungen

3.1. Randbedingungen und Annahmen

Folgende Randbedingungen wurden für alle Transportunternehmen gleichartig formuliert:

- **Bahnersatzleistungen:** Die Auswirkungen der Elektrifizierung auf die Bahnersatz- und andere Extraleistungen wurden nicht untersucht. Die Bahnersatz- und weiteren Extraleistungen gehören nicht zum bestellten Verkehr und bilden ein eigenes Geschäftsfeld für die Transportunternehmen. Entsprechend können hier verschiedene Strategien verfolgt werden – auch im Hinblick auf die fortschreitende Elektrifizierung der Busflotte. Das Thema Bahnersatz ist zusammen mit den Bahntransportunternehmen anzugehen. Die Strategie des VVL mit den Depotladern unterstützt die Möglichkeiten für Bahnersatz im Gegensatz zu reinen Gelegenheitsladern mit kleinen Batterien und dezentralen Ladeinfrastrukturen.
- **Depotstandorte:** Sämtliche Überlegungen basieren auf den heute in Betrieb stehenden Depotstandorten, obwohl im Zuge der Elektrifizierung nicht zwingend alle heutigen Standorte weiterbetrieben werden müssen. Es kann namentlich bei kleinen Depots überlegt werden, ob sie sich für eine Elektrifizierung eignen oder nicht. In den meisten Massnahmenplänen der Transportunternehmen ist deshalb vorgegeben, dass rasch geklärt werden muss, ob alle heutigen Standorte mit Ladeinfrastruktur ausgestattet werden sollen oder ob sich durch Umplatzierung von Fahrzeugen Optimierungspotentiale ergeben.
- **Ladepunkte:** Die Ladepunkte in den Depots werden mit standardisierten "Combo-2-Steckern" mit einer Leistung von 150 kW⁴ eingerichtet; höheren Ladeleistungen (zum Beispiel bis 300 kW) sind nicht nötig bzw. vorgesehen. Zum einen konnte im Rahmen der Machbarkeitsabklärungen nachgewiesen werden, dass Ladeleistungen von maximal 150 kW in den Depots ausreichend sind (vgl. Kapitel 3.2). Zum anderen werden die Ladekabel für Leistungen von mehr als 150 kW dicker, damit auch schwerer und können weniger gut verbaut werden. Pantograph-Lösungen werden damit nicht ausgeschlossen; diese sind vor allem im Hinblick eines längerfristig automatisierten Betriebs zu prüfen.
- **Steckplätze an den Fahrzeugen:** Die Steckplätze an den Fahrzeugen für die Combo-Stecker werden zwecks Flexibilität beidseits vorne bei der ersten Achse vorgesehen.
- **Keine fossilen Zusatzheizungen:** Die Machbarkeitsanalysen basieren auf der Annahme, dass der Betrieb inkl. Nebenaggregate zu 100% elektrisch erfolgt.
- **Verwendung von 100% erneuerbarem Strom:** Gemäss Strategie ist die Verwendung von 100% erneuerbarem Strom eine zentrale Voraussetzung, um die Prämisse «erneuerbar – effizient – emissionsarm» zu erfüllen. Entsprechend setzen auch die Umsetzungskonzepte für alle Transportunternehmen die Verwendung von 100% erneuerbarem Strom voraus.

⁴ Diese 150 kW sind als Ausgangsleistung des Gleichrichters zu verstehen. Um diese Ausgangsleistung zu erreichen, ist aufgrund von Wirkungsgradverlusten eine Eingangsleistung am Trafo von 180 kW erforderlich. Für die Dimensionierung der Nachladezeiten sind weitere rund 10% Wirkungsgradverluste, bis die Energie ab dem Gleichrichter tatsächlich in der Batterie ankommt, zu berücksichtigen. Die effektive Ladeleistung für die Batterie liegt damit bei 135 kW.

- **Anforderungen an das Lichtraumprofil von Elektrobussen:** E-Bussen sind ca. 20 – 40 cm höher als Dieselbusse und erreichen damit Fahrzeughöhen von bis zu 3.40m/3.50m. Gemäss Abklärungen bei den Transportunternehmen bestehen auf dem aktuellen Busnetz keine Situationen mit Höhenbeschränkungen < 3.50m. Ausweichrouten für Ersatzverkehre und Bahnersatzfahrten wurden nicht geprüft.

Eine weitere Randbedingung bilden die Eigentumsverhältnisse der Depotstandorte und der damit zusammenhängenden Entscheidungskompetenz beim Einbau von Ladeinfrastrukturen. Die Situationen wurden mit den Transportunternehmen einzeln aufgenommen und in den Teilberichten dokumentiert.

Eine weitere wichtige Randbedingung – der Startpunkt für die Umsetzung der Elektrifizierung – musste für jedes Transportunternehmen individuell festgelegt werden. Dieser Startzeitpunkt schwankt zwischen den Fahrplanjahren 2024 und 2026. Der vorliegende Bericht enthält nur die Umsetzung ab jeweils diesen vereinbarten Zeitpunkten. Der unterschiedliche Startpunkt pro Transportunternehmen kommt wie folgt zustande:

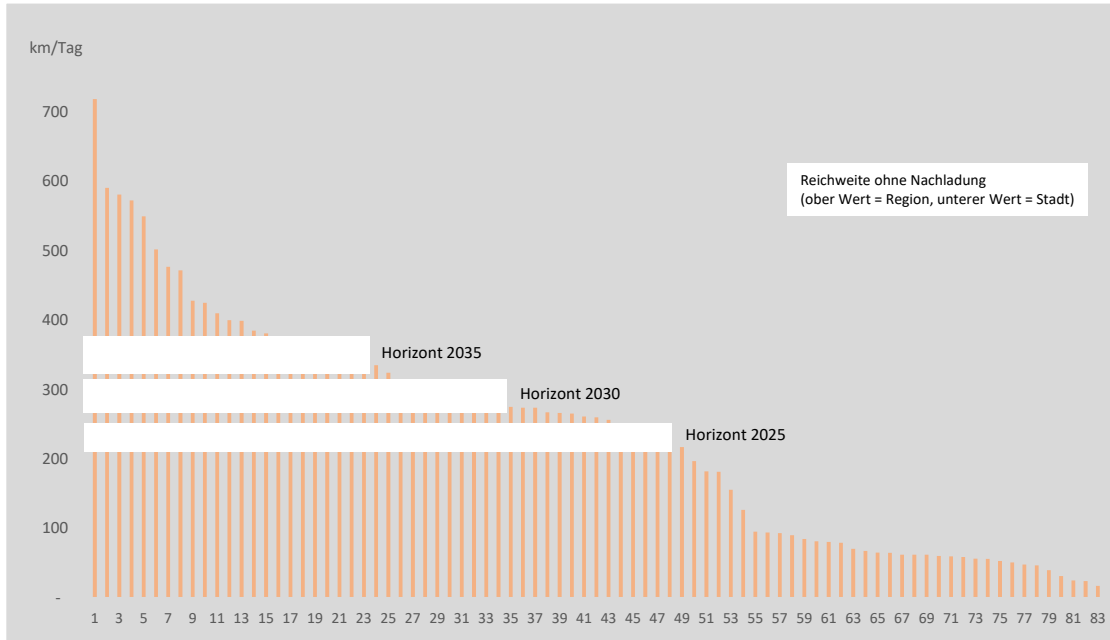
- Bestehende oder mit dem VVL bereits vereinbarte (und finanzierte) Massnahmen zur Elektrifizierung (bspw. sind im Horizont 2024 im Kanton Luzern schon total 21 Elektrobusse bei vier Transportunternehmen im Einsatz).
- Vom VVL beabsichtigte oder bereits beschlossene Anpassungen am Fahrplanangebot oder an den Gefässgrössen.
- Geplante Umstellungen auf Trolleybusse bis 2029.

3.2. Machbarkeit Depotlader

Bei der Analyse der Fahrzeugumläufe wurde zusammen mit den Transportunternehmen detailliert geprüft, unter welchen Bedingungen eine Elektrifizierung ab dem definierten «Startpunkt» machbar ist. Dabei stellte sich die Depotladung als optimale Technologie heraus:

- **Günstiger:** Anstelle von teuren und unflexiblen Ladepunkten auf den Strecken sind wenige Zusatzfahrzeuge nötig;
- **Flexibler:** Höhere Flexibilität im Betrieb und in der zukünftigen Angebotsentwicklung;
- **Zuverlässigkeit:** Höherer Standardisierungsgrad bei den Ladeschnittstellen;
- **Weiterentwicklungspotenzial:** die Reichweiten der Depotlader-Batterien werden gemäss aktuellen Prognosen weiter zunehmen, so dass künftig weniger Zusatzfahrzeuge erforderlich sind (vgl. Beispiel der Gelenkbus-Fahrzeugumläufe in der Abbildung 12).

Abbildung 12: Gelenkbus-Tageseinsätze 2023 im VVL (vbl, PAG, ARAG, AAGR, BSF/ZVB)

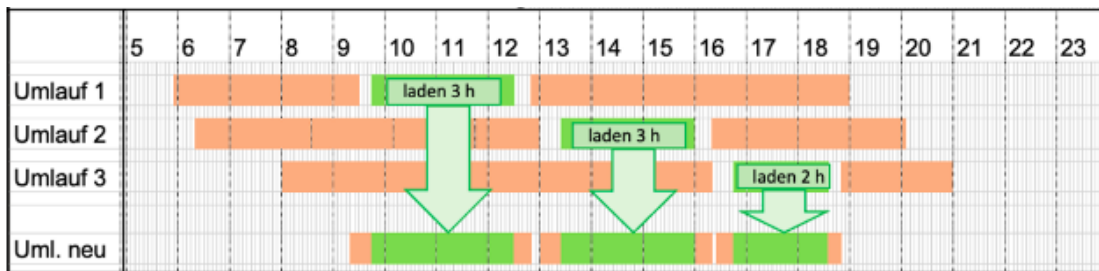


Die Tageseinsätze über den jeweiligen Bandbreiten pro Horizont müssen bei Einsatz von Elektrobusen neu disponiert bzw. aufgeteilt werden, damit sie zum Nachladen ins Depot fahren können.

Grafik INFRAS/OGS. Quelle: Fahrzeugumlaufpläne der Transportunternehmen

Dort, wo die Dieselfahrzeuge heute sehr lange Strecken zurücklegen, wurden die Tageseinsätze mit einem oder mehreren Zusatzfahrzeugen neu aufgeteilt.

Abbildung 13: Illustratives Simulation-Modell «Nachladen von Fahrzeugen bei ungenügenden Reichweiten»



Schematische Darstellung einer einfachen Simulation mit der Aufteilung von drei (Diesel-) Fahrzeugumläufen auf neu vier Elektrobusumläufe im Tagesverlauf. Mit einem zusätzlichen Fahrzeug («Uml. neu») können die drei Umläufe «aufgeschnitten» und je eine Nachlademöglichkeit im Depot geschaffen werden

Grafik INFRAS/OGS.

Die Machbarkeit für die Depotlader wurde für alle Tageseinsätze am anforderungsreichsten Tag (i.d.R. der Freitag mit Nachtstern-Angebot) anhand von Simulationen nachgewiesen. Dabei

stellte sich heraus, **dass die Elektrifizierung zusätzliche Fahrzeuge erfordert**. Dafür verantwortlich sind folgende Gründe:

- Bei sehr langen Tageseinsätzen, welche mit einem Dieselfahrzeug problemlos zu bewältigen sind, müssen beim Einsatz von Elektrofahrzeugen mit limitierten Reichweiten zusätzliche Fahrzeuge eingeplant werden.
 ⇒ **Zusätzlicher Fahrzeugbedarf (umlaufbedingt): + 22 Fahrzeuge.**
- Elektrobusse werden oft auch tagsüber zwischengeladen. Deshalb stehen sie im Unterschied zu Dieselbussen weniger für Wartungsarbeiten oder ungeplante Betriebseinsätze, Bahnersatz- oder andere Extraleistungen zur Verfügung. Es muss bei der Elektromobilität mit einem leicht höheren Bedarf an Reservefahrzeugen gerechnet werden. Wo der Reservebestand heute nur "knapp" vorhanden ist, muss nun mit einem Zusatzfahrzeug kalkuliert werden.
 ⇒ **Zusätzliche Fahrzeugbedarf (reservebedingt): + 4 Fahrzeuge** (ohne Reserve für Bahnersatz- und andere Extraleistungen; vgl. 3.1 Randbedingungen und Annahmen).
- Damit resultiert im Kanton Luzern total ein zusätzlicher Fahrzeugbedarf von + 26 Fahrzeugen. Bei einem Bestand 2040 (ohne Trolleybusse) von 224 Elektrobussen entspricht dies einer Zunahme von 13%.
- Mit den Entwicklungen in der Batterietechnologie und damit der Reichweite der Elektrobusse kann der zusätzliche Fahrzeugbedarf möglicherweise noch gesenkt werden. Dies muss jeweils vor der Beschaffung von neuen Fahrzeugen geprüft bzw. der Bedarf an Zusatzfahrzeugen muss jeweils unter Berücksichtigung der neusten Technologie nachgewiesen werden.

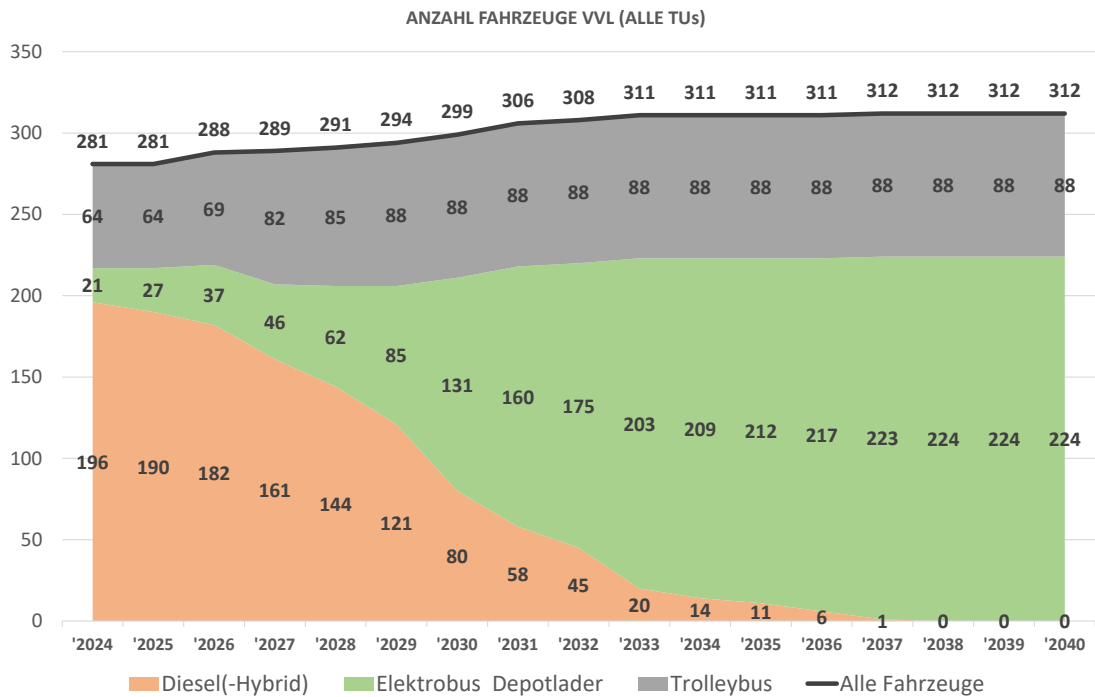
Weitere Feststellungen:

- Die Ladeinfrastrukturen befinden sich in den Depots. Es kommen in der Regel Combo-Stecker zum Einsatz. Die Fahrzeuge können im Hinblick auf das in Zukunft mögliche automatische Navigieren der Busse auf den Depotarealen auch mit Pantografen und einem entsprechenden System geladen werden.
- Es sind keine dezentralen Ladeinfrastrukturen auf den Linien notwendig; inwiefern im Zusammenhang mit Angebotserweiterungen und Bahnersatzleistungen dezentrale Ladestationen (vorzugsweise an Bahn- oder Busknoten) sinnvoll sind, wird nicht im Rahmen dieses Berichts geklärt und bleibt damit offen. Der VVL hat hierzu ein Positionspapier erarbeitet (vgl. Annex 2).
- Die täglich notwendigen Fahrzeug-Austauschfahrten der Elektrobusse führen zu einem zusätzlichen Betriebsaufwand in Stunden und Kilometer. Dieser Mehraufwand wurde in der Abgeltungsentwicklung berücksichtigt (vgl. Kap. 4.2).

3.3. Flottenentwicklung

Über alle Transportunternehmen ergibt sich durch die Fahrzeugumstellungen ein sog. «Elektrifizierungspfad» für den ganzen Kanton Luzern. Demnach wird im Jahr 2037 der letzte Dieselbus im VVL-Gebiet ausser Betrieb gehen und die ganze Busflotte auf Elektromobilität umgestellt sein. Entsprechend wird im Jahr 2024 zum letzten Mal ein neues Dieselfahrzeug in Betrieb genommen. Damit kann die Vorgabe aus der kantonalen Klimastrategie erfüllt werden.

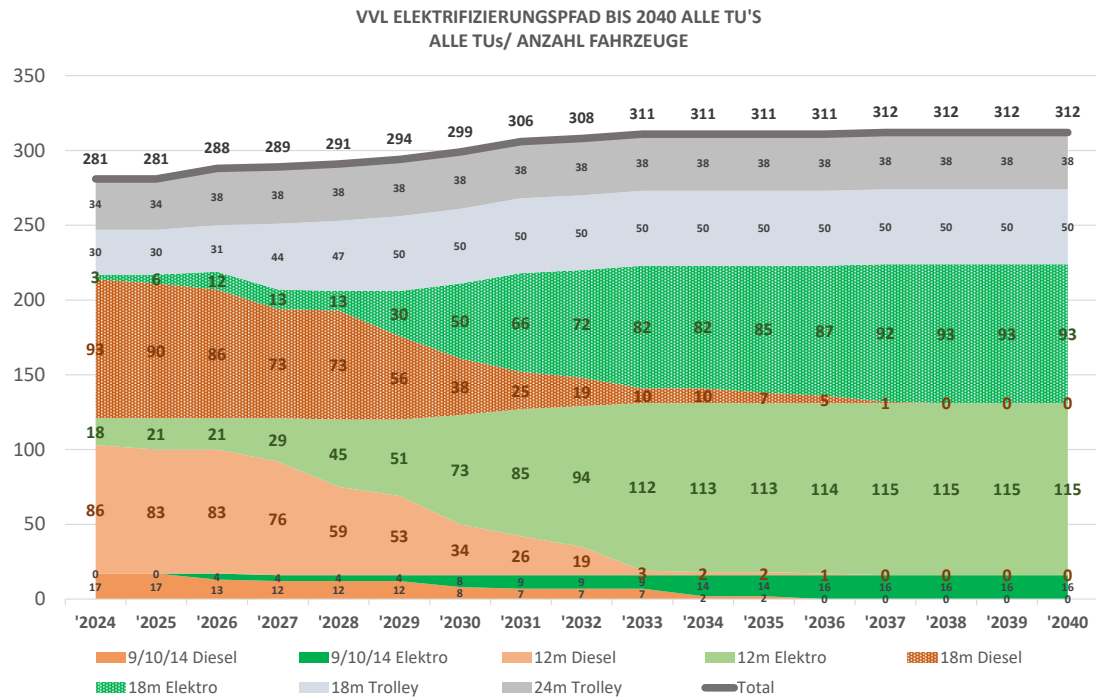
Abbildung 14: Elektrifizierungspfad VVL 2024 bis 2040 (vbl, PAG, ARAG, AAGR, BSF/ZVB)



Die Trolleybusflotte ist nicht Teil des Umsetzungskonzepts. Trotzdem wird diese Teilflotte hier dargestellt, weil in den Jahren 2024 – 2029 Dieselbusse auch auf Trolleybusse umgestellt werden.

Grafik INFRAS/OGS.

Abbildung 15: Elektrifizierungspfad VVL nach Fahrzeugtyp 2024 bis 2040

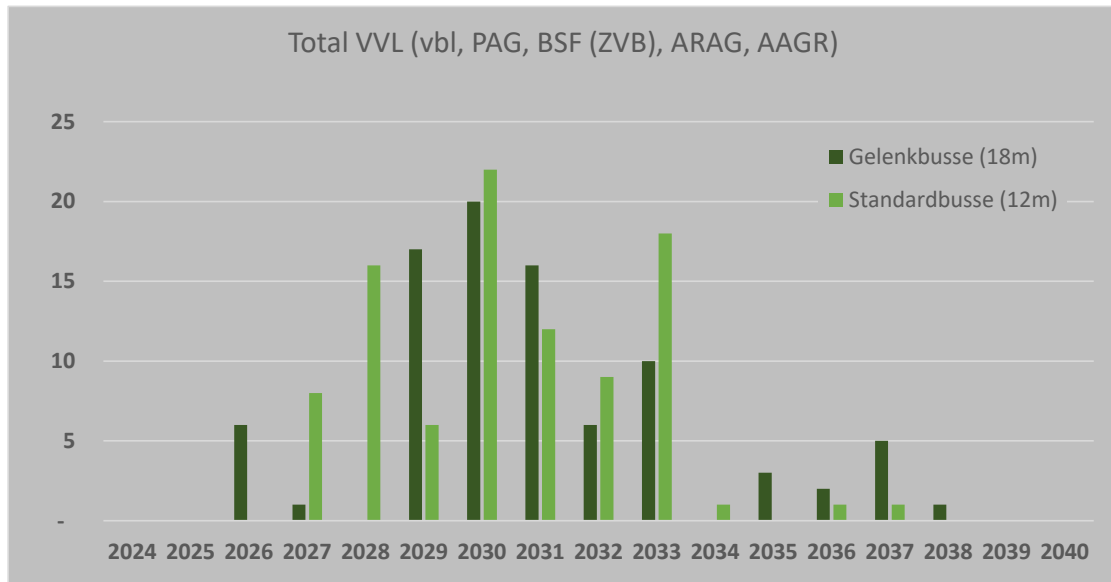


Grafik INFRAS/OGS.

Bei der Planung der Fahrzeugbeschaffungen pro Transportunternehmen wurde darauf geachtet, dass die Umstellungen möglichst in Gruppen stattfinden werden und parallel der Ausbau der Ladeinfrastrukturen ebenfalls in Etappen erfolgen kann. Für die Gruppenbildung wurde die Abschreibedauer einzelner Dieselfahrzeuge teilweise verlängert.

Für die beiden grössten Fahrzeugkategorien, 12m- und 18m- Fahrzeuge, wird es vor allem in den Jahren 2029 bis 2031 zu einer starken Konzentration an Fahrzeugersatzbeschaffungen bei verschiedenen TU kommen. Dabei kann das Potential einer gemeinsamen Fahrzeugbeschaffung erahnt werden. Ein Pooling bei der Fahrzeugbeschaffung wäre von den jeweils beteiligten Transportunternehmen zu organisieren. Es wird empfohlen, die Beschaffungen mehrerer aufeinanderfolgender Jahre zusammenzufassen (i.d.R. 2-4 Jahre, idealerweise parallel zu den Fahrplanperioden) und entsprechende Beschaffungsgruppen zu initiieren.

Abbildung 16: Geplante Inbetriebnahme von Batteriefahrzeugen im VVL (Anzahl pro Jahr)



Grafik INFRAS/OGS.

3.4. Anforderungen Depot-/Werkstattinfrastruktur

Mit jedem Transportunternehmen wurde individuell die rechtzeitige Bereitstellung der Depot- und Werkstattinfrastruktur auf Basis des heutigen Wissenstandes besprochen und in den Teilberichten festgehalten. Die vorgeschlagenen Massnahmen sind im Zuge der jeweiligen Investitionsplanungen noch einmal zu überprüfen und zu aktualisieren.

Erfolgt die Installation von Ladeinfrastrukturen in einem Depot in Etappen, so werden in der Regel die Grundinvestitionen (Stromversorgung, Kabelschächte, bauliche Anpassungen, usw.) zusammen mit der ersten Etappe vorgenommen. Bei den Investitionsschätzungen wurden solche Etappierungen je nach vorliegender Reife des Projekts berücksichtigt.

Bei der Anzahl notwendiger Ladepunkte wurden ca. 10% mehr Ladepunkte (minimal jeweils 1 zusätzlicher Ladepunkt) geplant, als Elektrofahrzeuge vorgesehen sind. Diese zusätzlichen Ladepunkte dienen der betrieblichen Flexibilität bei Störungen und dem optimalen Einreihen der Fahrzeuge für die Ladung.

Ein erster Peak bei den Investitionen in die Ladeinfrastruktur erfolgt bereits im Horizont 2027, ein zweiter und noch höherer dann im 2030 (vgl. auch Kapitel 4.1).

Nicht berücksichtigt werden Brandschutz-Massnahmen, weil es zurzeit noch keine klaren Vorgaben oder Standards in der Branche gibt. Brandschutz-Massnahmen sind somit in den Umsetzungskonzepten der Transportunternehmen nicht berücksichtigt. Entsprechende Massnahmen könnten somit die Investitionskosten noch erhöhen.

3.5. IT-Anforderungen

Die Elektrifizierung der Busflotten setzt auch Anpassungen bei der Datenverarbeitung voraus:

- Einerseits muss während dem Betrieb der Ladestand der Batterien in den Fahrzeugen überwacht werden können (Monitoring Batteriestand, Integration Information in Leitstelle).
- Andererseits muss sichergestellt werden können, dass die Fahrzeuge am Morgen immer vollgeladen ausfahren können (Monitoring der Ladevorgänge, Lademanagementsystem).
- Je nach Grösse der Depotstandorte muss auch sichergestellt werden, dass die Fahrzeuge abhängig vom Ladezustand ihrer Batterie und dem Strombedarf für den nächsten Einsatz am geeigneten Ladepunkt geladen werden (Kombination mit Betriebshofmanagementsystem).
- Schliesslich muss überwacht werden können, dass die vorgängig definierte, maximale Stromleistung nicht überschritten wird (Lastmanagement, Peak-shaving).

3.6. Massnahmenpläne pro Transportunternehmen

Im Rahmen der Teilberichte pro Transportunternehmen wurden Massnahmenpläne festgehalten. Typische Massnahmen sind zum Beispiel: Vorbereitung Fahrzeugbeschaffungen, Elektrifizierungskonzepte für die Depots, Überprüfung Depotkonzept/-Standorte. Aus Gründen der Vertraulichkeit können diese hier nicht im Detail wiedergegeben werden. Diese Massnahmenpläne bilden eine Grundlage für das Monitoring durch den VVL (vgl. Kap. 6.3).

4. Kostenauswirkungen

Das Ziel der Abschätzungen zu den Kostenauswirkungen der Elektrifizierung ist, die Grundlage für die Budgetierung der notwendigen Abgeltungen für den VVL und somit über alle TU zu schaffen bis zur vollständigen Umstellung auf fossilfreie Busse. Die Kostenschätzungen wurden mit generellen Annahmen aus Sicht Gesamt-VVL erstellt. Für die einzelne TU können diese aufgrund spezifischer Rahmenbedingungen abweichen. Über den gesamten VVL betrachtet dürften sich diese Unterschiede ausgleichen bzw. sich im Rahmen der Unsicherheiten derartiger Kostenschätzungen bewegen.

Differenzierte Kostenschätzungen für die Investitionen in die Fahrzeuge und die Ladeinfrastrukturen sowie die betrieblichen Mehrkosten aus der Elektrifizierung werden für die fünf Transportunternehmen vbl, PAG, ARAG, AAGR und BSF (ZVB), für welche der VVL als Hauptbesteller verantwortlich ist, vorgenommen. Die Mehrkosten für Linien von Transportunternehmen, für welche der VVL nur Minderheitsbesteller ist (AVA-Linien im Raum Zofingen und die AAGS-Linien im Raum Küssnacht a.R.), werden in Analogie zum Mittelwert der anderen Linien pauschal auf Ebene der Abgeltungen geschätzt.

4.1. Investitionen

Fahrzeuge

Die Abschätzung der Mehrkosten für die Beschaffung basieren auf folgenden Annahmen:

- Fahrzeugpreise im Jahr 2024:

Busgrösse	Dieselbus Hybrid	E-Bus <u>ohne</u> Ersatzbatterie
	[CHF/Bus]	[CHF/Bus]
Gelenkbus (18m)	450'000.-	900'000.-
Standardbus (12m)	350'000.-	700'000.-
Midibus (10.5m)	330'000.-	660'000.-
Minibus (9m)	175'000.-	350'000.-

Die Busbeschaffungskosten basieren auf bisherigen Erfahrungswerten der TU; je nach Lieferanten und Anforderungen an die Fahrzeugspezifikationen/-ausrüstungen variieren diese. Die den Berechnungen unterstellten Werte sind im Sinne eines Durchschnittswertes über den gesamten VVL zu verstehen.

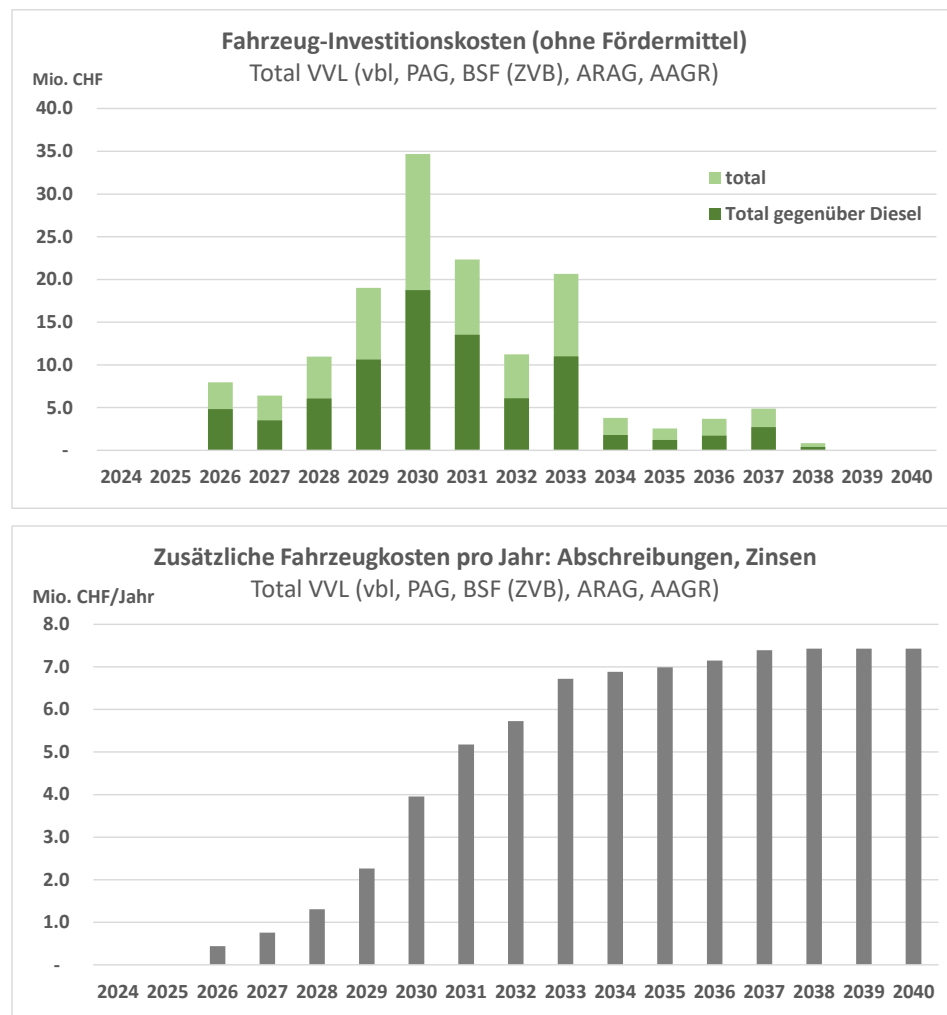
- Preisentwicklung:
 - Diesel-Hybridbusse: konstante Preise
 - E-Busse: Preisabnahme von 0.5% pro Jahr

- Folgekosten aus der Beschaffung (Annuität):
 - Zinssatz: 1.5%
 - Lebensdauer: 12 Jahre für Diesel-Hybridbusse und E-Busse.

Der während der Fahrzeuglebensdauer erforderliche Ersatz der Batterien erfolgt gemäss Annahmen nicht mittels einem Komplettaustausch der Batterien, sondern über einen bedarfsge- steuerten (Teil-)Austausch von Batteriemodulen. Entsprechend werden diese Kosten über die Unterhaltskosten und nicht in den Investitionskosten kalkuliert (vgl. auch Kap. 4.2).

Die folgenden Abbildungen zeigen die erforderlichen Investitionen in die Fahrzeugflotte sowie die Auswirkungen auf die daraus resultierenden jährlichen Mehrkosten gegenüber einem Dieseldiesbusbetrieb (mit Mineralölsteuer-Rückerstattung, ohne Fördermittel).

Abbildung 17: Investitionen für Fahrzeugbeschaffungen und Folgekosten pro Jahr



Grafik INFRAS/OGS.

Ladeinfrastrukturen, Werkstattanpassungen und IT

Die erforderlichen Investitionen in die Ladeinfrastrukturen und Werkstattanpassungen hängen von den lokalen Voraussetzungen der verschiedenen Depots ab. Die Investitionen in die Ladeinfrastruktur für die 225 Ladepunkte⁵ belaufen sich auf rund 43 Mio. CHF. bzw. durchschnittlich knapp 200'000 CHF pro Ladepunkt über den gesamten VVL. Für die Abschätzung der Folgekosten aus diesen Investitionen werden folgende Annahmen getroffen:

- Folgekosten aus der Beschaffung (Annuität):
 - Zinssatz: 1.5%
 - Lebensdauer (in Anlehnung Verordnung RKV des UVEK):

	Jahre
- Zuleitungen und Trafo:	20
- Ladepunkt:	10
- Bauliche Anpassungen:	20
- IT-Investitionen:	5
- Unterhaltskosten inkl. IT-Massnahmen: 3% der Ladeinfrastrukturinvestitionen

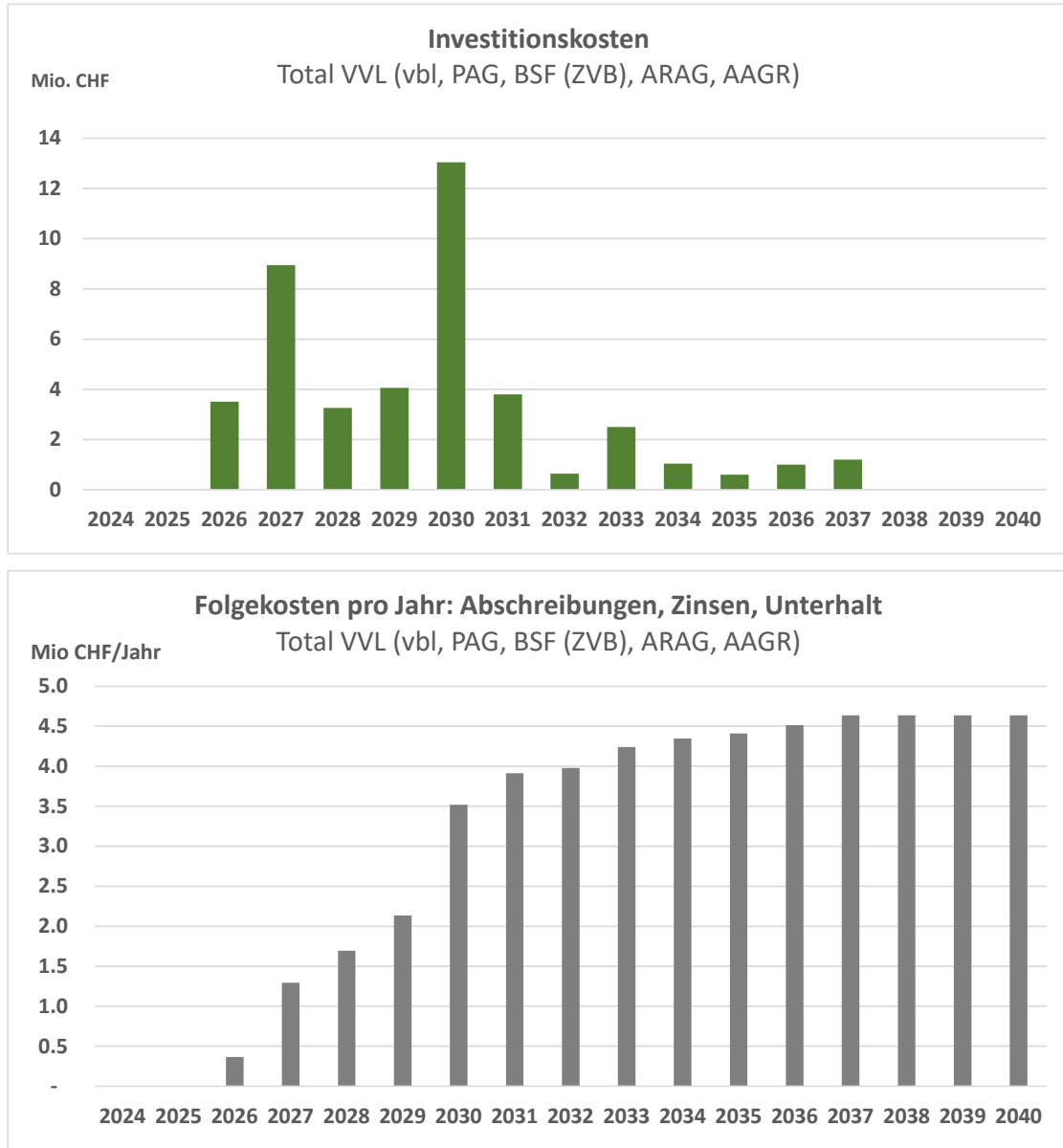
Zusätzliche Abstellflächen in den Depots

Die durch die Elektrifizierung resultierenden Zusatzfahrzeuge (umlauf- und reservebedingt; vgl. 3.2) benötigen zusätzliche Abstellflächen. Der dafür zusätzlich erforderliche Flächenbedarf in den Depots ist im Rahmen der Depotkonzepte durch die Transportunternehmen zu eruieren. Die entsprechenden Kosten sind in diesem Bericht nicht berücksichtigt, werden aber für die Budgetierung durch den VVL zusammen mit den TU geschätzt.

Die folgenden Abbildungen zeigen die erforderlichen Investitionen in den Depots sowie die Auswirkungen auf die daraus resultierenden jährlichen Mehrkosten. Die zu realisierenden Ladeinfrastrukturen sind in Abbildung 18 oben auf den Zeitpunkt der Inbetriebnahme der E-Busse dargestellt; effektiv fallen die Investitionen in den Jahren davor an.

⁵ Die Anzahl erforderlicher Ladepunkte widerspiegelt die Anzahl Batteriebusse inkl. Zusatzbusse, welche die Dieselbusse ab 2026 ersetzen (Annahme: 1 Ladepunkt pro Bus), sowie ca. +10% betriebliche Reserve bzw. Redundanz für ausfallende Ladepunkte.

Abbildung 18: Investitionen in den Depots (inkl. Werkstatt und IT) und Folgekosten pro Jahr



Bemerkung: Die Kostenfolgen der zusätzlich benötigten Abstellflächen sind nicht berücksichtigt.

Grafik INFRAS/OGS.

4.2. Auswirkungen auf die Betriebskosten

Für die Abschätzung der betrieblichen Mehrkosten infolge der Elektrifizierung der Busflotte sind folgende Aspekte relevant:

Energiekosten Fahrbetrieb

Die Differenz zwischen E-Bus- und Diesel-Hybridbusbetrieb wird mittels folgender Annahmen geschätzt:

▪ Diesel-Hybrid

	Diesel		Dieselpreis				AdBlue		Total Energiekosten/Jahr			
	Ø km/Jahr	Ø Verbrauch	l/a	CHF/l		CHF/l	Ø Verbrauch	l/a	AdBlue-Preis		CHF/a/Bus	
	km/a	l/100km		mit	ohne				CHF/l	CHF/a/Bus	CHF/a/Bus	
			MinöSt- Rückerstatt.	MinöSt- Rückerstatt.			mit MinöSt- Rückerstatt.	ohne MinöSt- Rückerstatt.				
18m	80'000	45.0	36'000	1.20	1.78	1.40	1'120	0.36	43'603	64'483		
12m	80'000	35.0	28'000	1.20	1.78	1.09	871	0.36	33'914	50'154		
10.5m	80'000	30.0	24'000	1.20	1.78	0.93	747	0.36	29'069	42'989		
9m	80'000	25.0	20'000	1.20	1.78	0.78	622	0.36	24'224	35'824		

▪ E-Bus

	Erneuerbarer Strom		Strompreis	Total Energiekosten/Jahr	
	Ø km/Jahr	Ø Verbrauch		kWh/a	CHF/kWh
	km/a	kWh/km			
18m	80'000	1.90	152'000	0.27	41'040
12m	80'000	1.40	112'000	0.27	30'240
10.5m	80'000	1.20	96'000	0.27	25'920
9m	80'000	1.00	80'000	0.27	21'600

Minderkosten E-Bus

ohne MinöSt- Rückerstatt.	mit MinöSt- Rückerstatt.
CHF/a/Bus	CHF/a/Bus
-23'443	-2'563
-19'914	-3'674
-17'069	-3'149
-14'224	-2'624

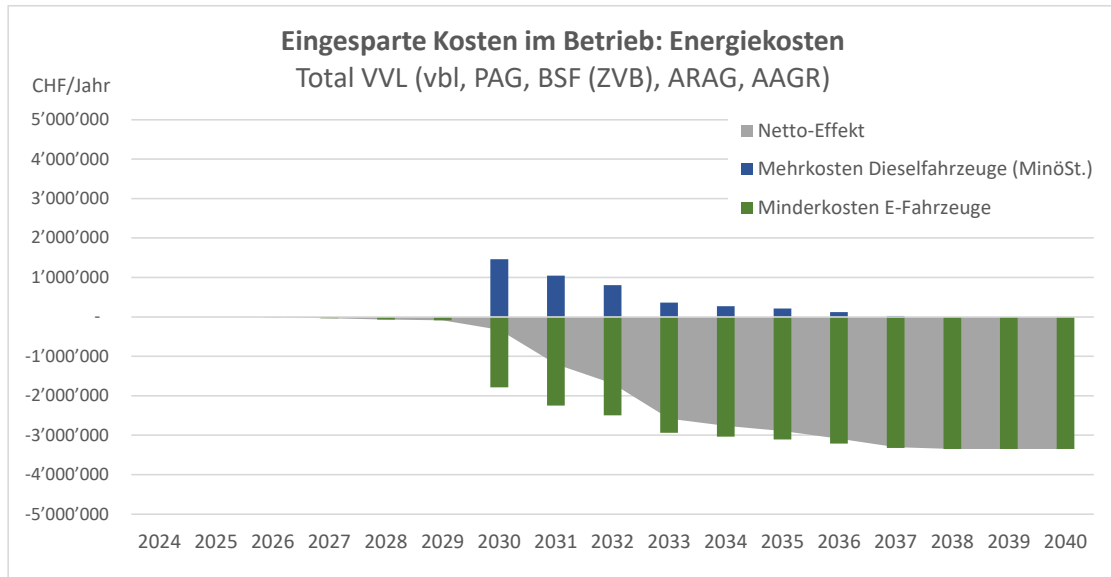
Bemerkung: Die oben ausgewiesenen Energieverbräuche gelten als Durchschnittswerte für den Regionalverkehr. Für die im Stadtverkehr eingesetzten Busse wird von 15% höherem Verbrauch ausgegangen. Der angenommene Strompreis von 27 Rp. / kWh bezieht sich auf 100% erneuerbaren Strom.

Wirkungsgradverluste der Ladeinfrastruktur (ca. 10%) sind bei der Abschätzung der Stromkosten nicht berücksichtigt. Die Energiekosten sind damit tendenziell unterschätzt. Dieser Effekt dürfte über die Jahre durch energieeffizientere Antriebe zumindest teilweise kompensiert werden. In der Sensitivitätsanalyse sind die Auswirkungen eines rund 10% höheren Strompreises bzw. für 30 Rp. / kWh aufgezeigt.

Solange die Mineralölsteuer-Rückerstattung nicht aufgehoben wird, resultieren keine massgebenden Auswirkungen auf die Betriebskosten von Dieselbussen. Gemäss aktuellem Stand der Revision des CO₂-Gesetzes ist die **Aufhebung der Mineralölsteuer-Rückerstattung per 2030** vorgesehen. Mit der Aufhebung der Rückerstattung verteuert sich der Betrieb für die ab 2030 noch im Einsatz stehenden Dieselbusse. Umgekehrt profitieren die E-Busse aufgrund tieferen

Energiekosten verglichen mit dem Dieselbusbetrieb. Die folgende Abbildung zeigt die beiden Effekte sowie der daraus resultierende Netto-Effekt.

Abbildung 19: Eingesparte Energiekosten E-Busse mit Aufhebung Mineralölsteuer-Rückerstattung ab 2030



Grafik INFRAS/OGS.

Fahrzeugunterhaltskosten

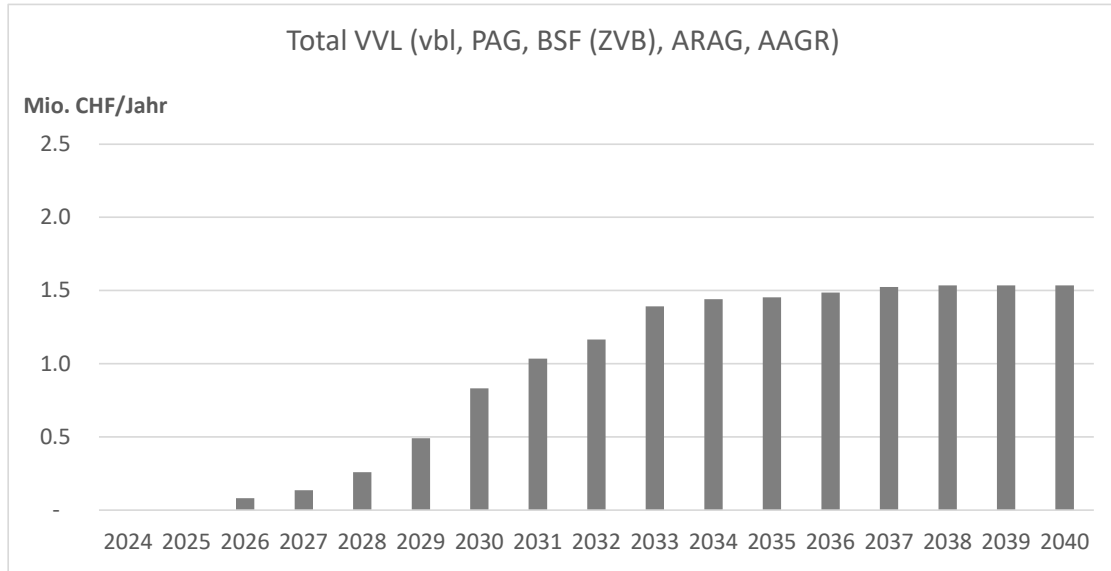
Bei den Unterhaltskosten kann zwischen Diesel- und Batteriefahrzeugen kein nennenswerter Unterschied festgestellt werden, wenn bei den Batteriebusen der Batterieersatz jeweils einkalkuliert wird; das heisst im Bereich Fahrzeugunterhalt wird von gleichbleibendem Aufwand ausgegangen.

Betriebliche Mehrkosten durch zusätzliche Fahrzeug-Austauschfahrten

Die Elektrifizierung der Busflotte führt zu vermehrten Depotein- und Depotausfahrten gegenüber dem heutigen Dieselbusbetrieb, weil die Batteriebusse auch untertags zum Nachladen ins Depot zurückkehren müssen. Die Abschätzung der daraus entstehenden zusätzlichen Betriebskosten basiert auf folgenden Annahmen:

- zusätzliche km-Leistung: 5 km pro Depotein- bzw. Depotausfahrt => 10 km pro Austausch; Kostensatz: CHF 1.50/km
- zusätzliche Fahrplan- bzw. Fahrpersonalstunden: 15 Min. pro Depotein- bzw. Depotausfahrt => 30 Min. pro Austausch; Kostensatz: CHF 65.-/Fpl-h

Abbildung 20: Betriebliche Mehrkosten durch zusätzliche Fahrzeug-Austauschfahrten



Grafik INFRAS/OGS.

4.3. Fördermittel

Revision CO₂-Gesetz auf Bundesebene

Gemäss aktuellem Stand der Revision des CO₂-Gesetzes ist für die Förderung von fossilfreien Antrieben im öffentlichen Busverkehr Folgendes vorgesehen:

- Bundesmitfinanzierung der **Mehrkosten bei der Beschaffung von fossilfreien Bussen** (nach Abzug übriger Fördergelder) mit einem Anteil von 75% im Regionalen Personenverkehr (RPV) und 30% im Ortsverkehr,
- à fonds perdu-Beiträge, zeitlich beschränkt auf die Periode 2026 bis 2030, maximal 47 Mio. CHF pro Jahr über die gesamte Schweiz.

Agglomerationsprogramm 5. Generation (AP 5G)

Für die Eingabe des Agglomerationsprogramms 5. Generation im Frühjahr 2025 können auch **Ladeinfrastrukturmassnahmen** berücksichtigt werden. Damit sie als A-Massnahme eingegeben und im Zeitraum 2028-2031 realisiert werden können, müssen sie Vorprojekt-Niveau aufweisen. Wie aus Abbildung 18 auf Seite 36 hervorgeht, fällt in diesem Zeitraum ein Grossteil der Investitionen in den Depots an. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, im AP 5G Projekte als B-Massnahme mit Realisierungshorizont 2032-2035 einzugeben. Aus heutiger Sicht ist

noch unklar, welche Massnahmen vom Bund effektiv als A-Massnahme genehmigt und damit ab 2028 mitfinanziert werden.

Gemäss Richtlinien Programm Agglomerationsverkehr des ARE vom 1. Februar 2023 können auch Beiträge an entsprechende Mehrkosten des Rollmaterials ausgerichtet werden, falls erhebliche Infrastrukturkosten eingespart werden. Dies betrifft vor allem die Umstellung auf Batterietrolleybusse, die oberleitungsfrei fahren können. Inwiefern auch Mehrkosten von Depotlader-Bussen über das Agglomerationsprogramm mitfinanziert werden können, ist zurzeit nicht klar.

Die im Kap. 4.4 ausgewiesenen Abgeltungen berücksichtigen noch keine Beiträge aus dem AP 5G.

Weitere Fördermittel

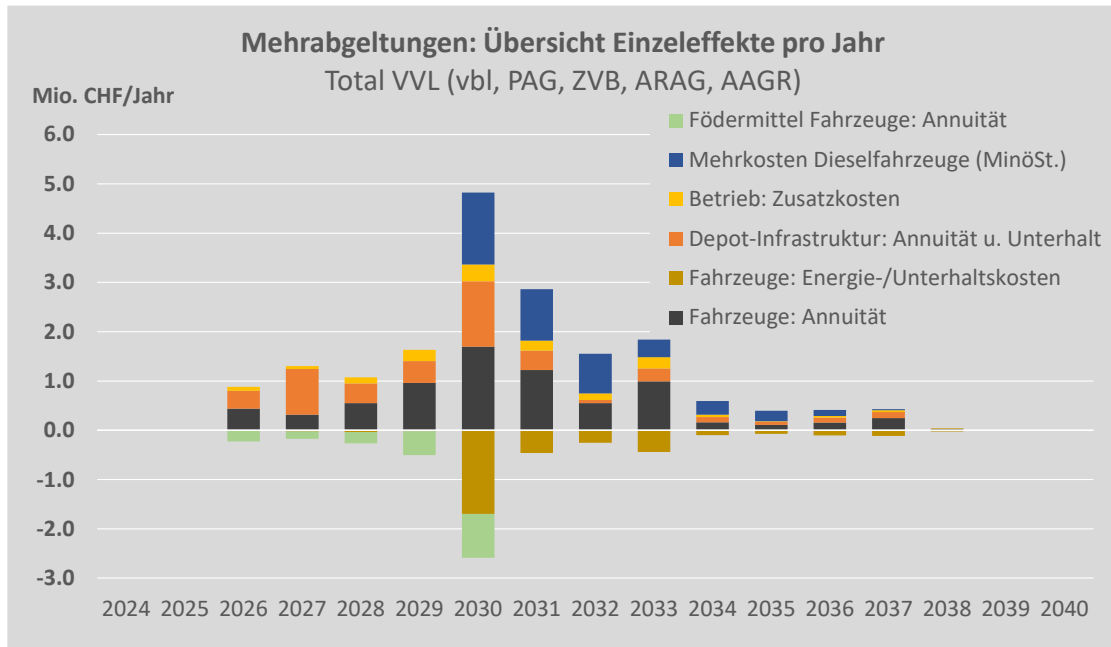
Weitere Fördermittel wie myclimate (www.myclimate.org/de-ch/) können zusätzlich von den TU angefordert werden. Entsprechende Gutschriften müssten dem VVL weitergereicht werden.

4.4. Auswirkungen auf die Abgeltungen

4.4.1. Gesamtabgeltungen

Die Abbildung 21 zeigt die aus der Elektrifizierung der Linien von Transportunternehmen, für welche der VVL als Mehrheitsbesteller auftritt, resultierenden Mehrabgeltungen pro Jahr, differenziert nach den einzelnen Effekten. In der Abbildung ausgewiesen sind die Mehrabgeltungen auf Basis des aktuellen Angebots gemäss Fahrplanjahr 2024. Nicht berücksichtigt sind die Mehrabgeltungen infolge der Umstellungen auf Trolleybusse sowie die Kostenfolgen der zusätzlich benötigten Abstellflächen in den Depots.

Abbildung 21: Mehrabgeltungen Bund, VVL und Nachbarkantone, Übersicht Einzeleffekte pro Jahr

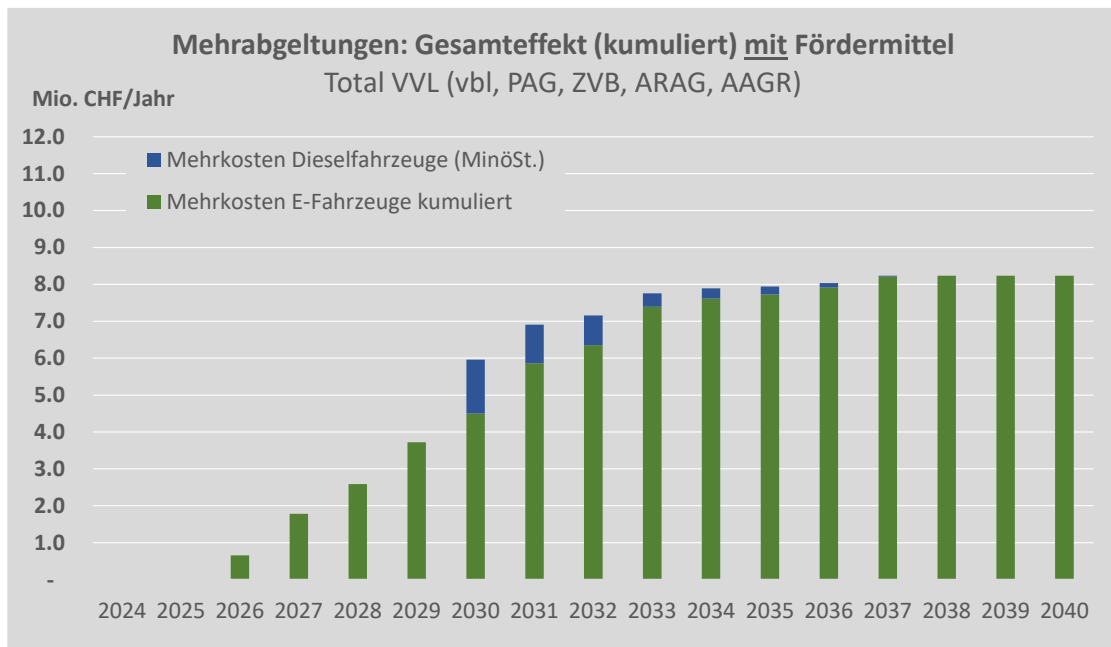
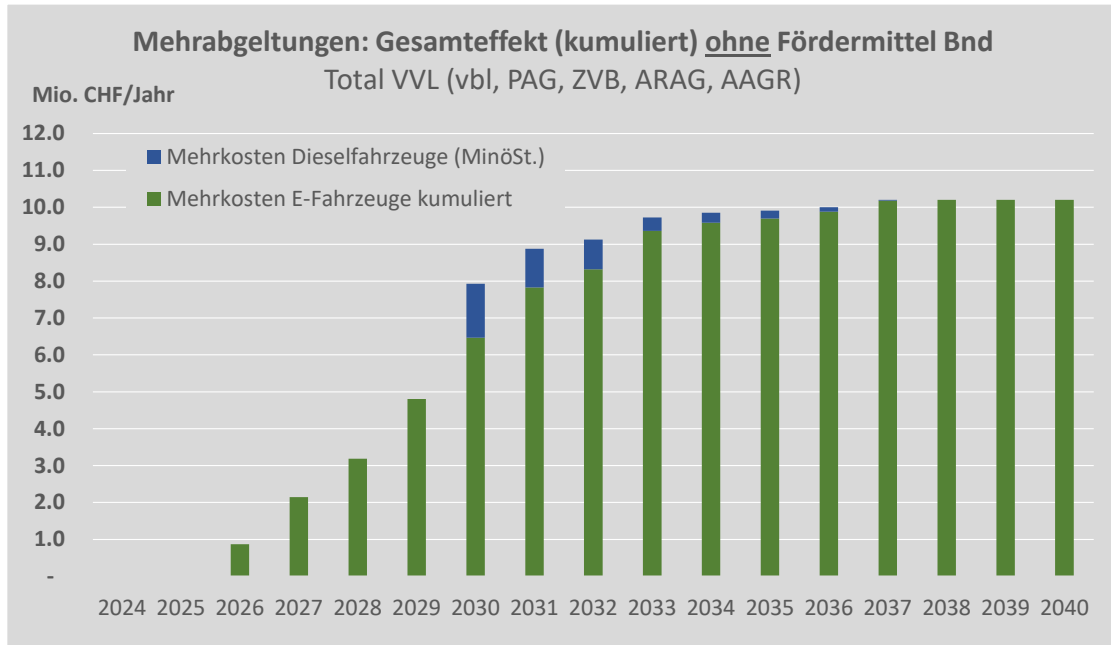


Basis: Angebot gemäss Fahrplanjahr 2024; Mehrabgeltungen infolge der Umstellungen auf Trolleybusse und die Kostenfolgen der zusätzlich benötigten Abstellflächen in den Depots sind nicht berücksichtigt.

Grafik INFRAS/OGS.

Die folgenden Abbildungen zeigen den zusätzlichen Abgeltungsbedarf der Elektrifizierung gegenüber dem Dieselbusbetrieb kumuliert. Auch dargestellt sind die Mehrkosten bei den Dieselnissen infolge der erwarteten Aufhebung der Mineralölsteuer-Rückerstattung ab dem Jahr 2030. Ohne Fördermittel für die Beschaffung von E-Bussen werden sich die gesamten Mehrabgeltungen nach vollständiger Umstellung in der Grössenordnung von ca. 10 Mio. CHF pro Jahr, mit Förderbeiträgen ca. 8 Mio. CHF pro Jahr, belaufen. Letzteres sind rund 18% Mehrabgeltungen bezogen auf die Abgeltungen 2024 der Linien von Transportunternehmen, für welche der VVL als Hauptbesteller auftritt.

Abbildung 22: Mehrabgeltungen Bund, VVL und Nachbarkantone (kumuliert) ohne und mit Förderbeiträge an die E-Busbeschaffung



Basis: Angebot gemäss Fahrplanjahr 2024; Mehrabgeltungen infolge der Umstellungen auf Trolleybusse und die Kostenfolgen der zusätzlich benötigten Abstellflächen in den Depots sind nicht berücksichtigt.

Grafik INFRAS/OGS.

4.4.2. Mehrabgeltungen für den VVL

VVL-Anteil für die 5 TU mit VVL als Hauptbesteller

Zur Abschätzung der Auswirkungen auf den Abgeltungsanteil des VVL wird pragmatisch angenommen, dass der VVL-Anteil an den Gesamtabgeltungen mit der Umstellung auf E-Busse in derselben Grössenordnung bleibt wie beim heutigen Angebot (durchschnittlich 73%⁶ bezogen auf das Total der Linien von TU, für welche der VVL Mehrheitsbesteller ist; je nach Linie bzw. Umstellungslos kann dieser Anteil variieren).

Zusätzliche Abgeltungen für VVL aus Linien AVA/AAGS

Für die Darstellung des VVL-Anteils an den Mehrabgeltungen werden zudem auch die Mehrkosten für die Umstellung der Linien von TU, für welche der VVL nur Minderheitsbesteller ist (AVA-Linien im Raum Zofingen und die AAGS-Linien im Raum Küssnacht a.R.), mitberücksichtigt, mit folgender Annahme: Die Abgeltung für den VVL erhöht sich für diese Linien prozentual gleich wie bei Linien als Mehrheitsbesteller (+18% mit Fördermittel).

Gesamteffekt: Abgeltungsanteil VVL

Die folgenden Abbildungen zeigen die Entwicklungen der jährlichen Mehrabgeltungen für den VVL (d.h. nach Abzug der Finanzierungsanteile des Bundes, der Nachbarkantone und Dritter) durch die Umstellung der Busflotte aller VVL-Linien auf fossilfreie Antriebe. Ohne Förderbeiträge erreichen diese bei vollständiger Umstellung ca. 7.5 Mio. CHF pro Jahr (+23%), mit Fördermittel ca. 6 Mio. CHF pro Jahr (+18%).

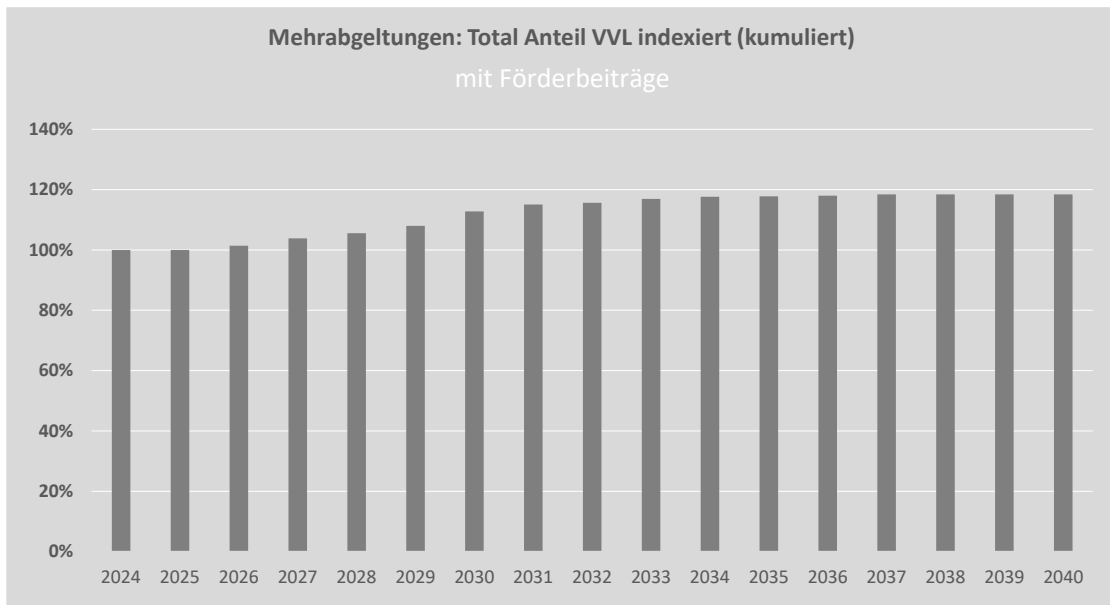
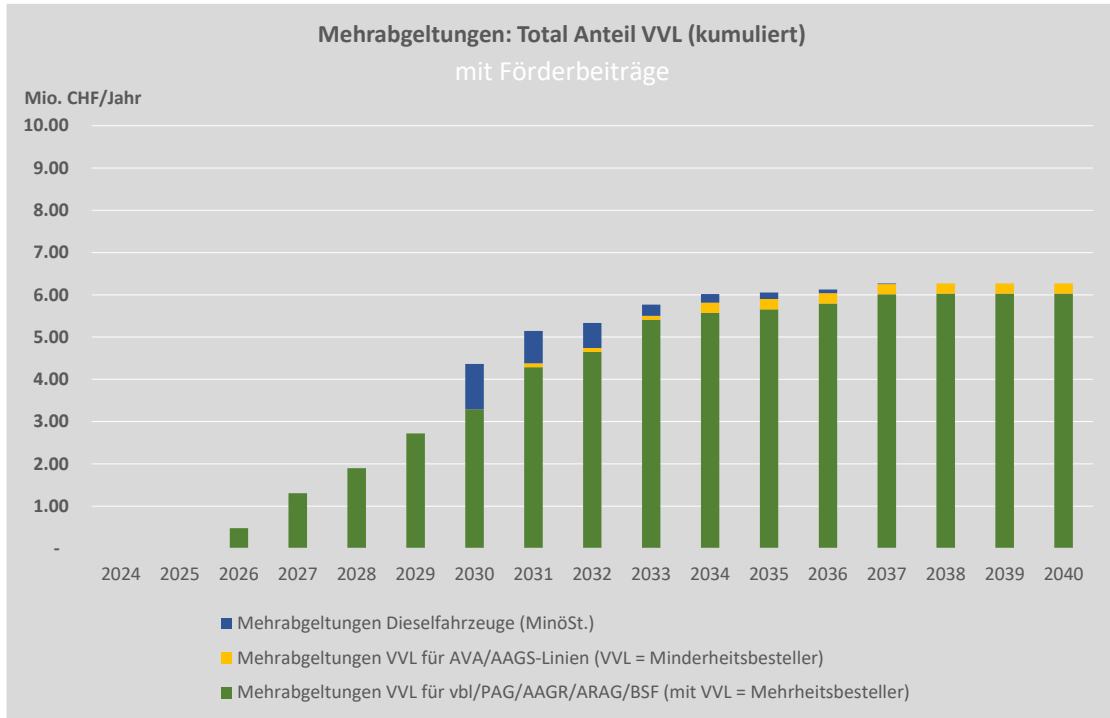
⁶ Anteil für die Transportunternehmen vbl (ohne Trolleybusse), PAG, ARAG, AAGR und BSF (ZVB) an allen vom VVL mitbestellten Buslinien gemäss Fahrplanjahr 2024.

Abbildung 23: Mehrabgeltungen VVL (kumuliert) ohne Förderbeiträge an die E-Busbeschaffung

Basis: Angebot gemäss Fahrplanjahr 2024; Mehrabgeltungen infolge der Umstellungen auf Trolleybusse und die Kostenfolgen der zusätzlich benötigten Abstellflächen in den Depots sind nicht berücksichtigt.

Grafik INFRAS/OGS.

Abbildung 24: Mehrabgeltungen VVL (kumuliert) mit Förderbeiträge an die E-Busbeschaffung



Basis: Angebot gemäss Fahrplanjahr 2024; Mehrabgeltungen infolge der Umstellungen auf Trolleybusse und die Kostenfolgen der zusätzlich benötigten Abstellflächen in den Depots sind nicht berücksichtigt.

Grafik INFRAS/OGS.

4.5. Sensitivitäten und Robustheit der Strategie

Einfluss sensibler Annahmen

Die Tabelle 3 und die nachfolgende Abbildung 25 zeigen die Auswirkungen auf den zusätzlichen Abgeltungsbedarf des VVL für die Elektrifizierung. Zum einen ist die Relevanz einzelner Annahmen absolut in CHF pro Jahr sowie in Prozent dargestellt. Zum anderen sind kumulierte Effekte verschiedener Sensitivitäten im Sinne eines «optimistischen» und «pessimistischen» aufgezeigt. Der Einfluss der einzelnen Sensitivitäten liegen jeweils in der Grössenordnung von +/- 10% bezogen auf die Mehrabgeltungen für den VVL. Im optimistischen Fall resultieren bei vollständiger Elektrifizierung jährlich rund 4 Mio. CHF an zusätzlichen Abgeltungen für den VVL (bei Förderbeiträge des Bundes), im pessimistischen Szenario wären es 9 Mio. CHF an Mehrabgeltungen pro Jahr. Das pessimistische Szenario mit höheren Zinsen, kürzerer Lebensdauer der Fahrzeuge, höheren Unterhaltskosten bei Infrastruktur und Fahrzeugen sowie höheren Strompreisen scheint aus heutiger Sicht eher als unwahrscheinlich.

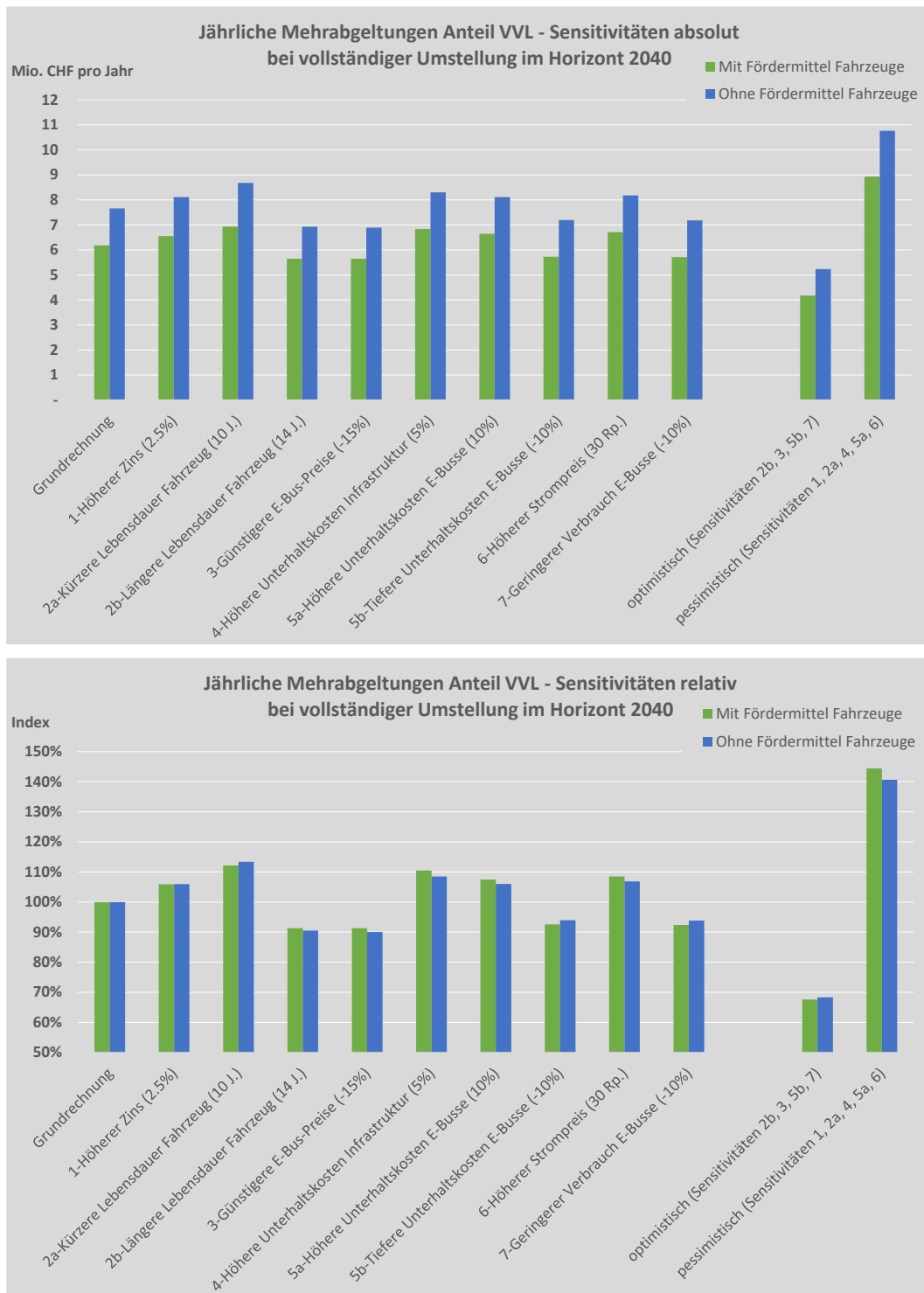
Tabelle 3: Auswirkungen verschiedener Sensitivitäten auf die Mehrabgeltungen für den VVL

Sensitivität	Annahme	Sensitivität	Auswirkung auf die Abgeltungen VVL	
			Absolut: CHF/a	Relativ
1-Höherer Zins	1.5%	2.5%	+ 0.4 Mio.	+ 6%
2a-Kürzere Lebensdauer Fahrzeug	12 Jahre	10 Jahre	+ 0.8 Mio.	+ 13%
2b-Längere Lebensdauer Fahrzeug	12 Jahre	14 Jahre	- 0.6 Mio.	- 10%
3-Günstigere E-Bus-Preise	0.7 Mio. CHF (12m) 0.9 Mio. CHF (18m)	- 15%	- 0.6 Mio.	- 10%
4-Höhere Unterhaltskosten Infrastruktur	3% der Investition	5%	+ 0.6 Mio.	+ 10%
5a-Höhere Unterhaltskosten E-Busse	Gleich wie Dieselbus	+ 10%	+ 0.5 Mio.	+ 7%
5b-Tiefere Unterhaltskosten E-Busse	Gleich wie Dieselbus	- 10%	- 0.5 Mio.	- 7%
6-Höherer Strompreis	27 Rp./kWh	30 Rp./kWh	+ 0.5 Mio.	+ 7%
7-Geringerer Verbrauch E-Busse	Ø 1.4 kWh/km (12m) Ø 1.9 kWh/km (18m)	- 10%	- 0.5 Mio.	- 7%
«optimistisch»: Sensitivitäten 2b, 3, 5b, 7			- 2.0 Mio.	- 32%
«pessimistisch»: Sensitivitäten 1, 2a, 4, 5a, 6			+ 2.8 Mio.	+ 45%

Basis: Angebot gemäss Fahrplanjahr 2024; Mehrabgeltungen infolge der Umstellungen auf Trolleybusse nicht berücksichtigt.

Tabelle INFRAS/OGS.

Abbildung 25: Auswirkungen verschiedener Sensitivitäten auf die Mehrabgeltungen für den VVL



Basis: Angebot gemäss Fahrplanjahr 2024; Mehrabgeltungen infolge der Umstellungen auf Trolleybusse und die Kostenfolgen der zusätzlich benötigten Abstellflächen in den Depots sind nicht berücksichtigt.

Grafik INFRAS/OGS.

Robustheit der Strategie

Die empfohlene Strategie mit Depotlader-Fahrzeugen und Nachladen in den Depots kann aus folgenden Gründen als robust betrachtet werden:

- Der Nachweis der Machbarkeit erfolgte auf Basis von eher konservativen Annahmen, v.a. bei den Fahrzeugbeschaffungskosten, aber auch bezüglich der Batteriekapazitäten sowie des spezifischen Energieverbrauchs der Fahrzeuge und damit bei den Reichweiten.
- Die Analysen zu den Fahrzeugumläufen enthalten noch weiteres Potenzial zur Optimierung der betrieblichen Abläufe. Der geschätzte Mehrbedarf an Fahrzeugen liegt tendenziell am oberen Rand.
- Mögliche Rückfallebene: Infrastrukturgänzungen mit dezentralen Ladestationen an den Linienenden (v.a. an Bahnhöfen/Umsteigeknoten) zur Erhöhung der Reichweiten bspw. im Rahmen von Angebotserweiterungen (mit 150 kW Stecker-Ladeleistung, damit Ausrüstung Fahrzeuge mit Pantographen nicht zwingend).

4.6. Risiken

Strommangellage

Der ÖV ist auf eine zuverlässige, sichere Versorgung mit elektrischer Energie angewiesen. Das Jahr 2022 hat der ÖV-Branche aufgezeigt, dass die Versorgung mit Energie nicht selbstverständlich ist. Basierend darauf hat die VÖV-Arbeitsgruppe «Strommangellage im ÖV» eine Branchendokumentation erarbeitet, welche die für Transportunternehmen notwendigen Schritte bei einer Strommangellage aufzeigt.⁷ Ob bzw. in welchem Umfang sich Strommangellagen auf das ÖV-Angebot auswirken, hängt im konkreten Fall von den Prioritäten der behördlich angeordneten Massnahmen über alle wirtschaftlichen Branchen ab. In Extremsituationen könnte eine Strommangellagen zu Einschränkungen beim Angebot führen.

Volatile Strompreise

Die Abschätzung der Entwicklung der Strompreise ist schwierig, weil abhängig von einem volatilen Markt. Dieses Phänomen besteht aber bereits heute auch beim Diesel. Um die Ausschläge zu glätten bzw. die Planbarkeit der Energiekosten zu verbessern, können Absicherungsverträge zwischen den Transportunternehmen und den Energielieferanten abgeschlossen werden, wie das auch heute beim Dieseleinkauf praktiziert wird.

⁷ [Strommangellage - voev.ch](https://www.voev.ch)

Liefer-/Projektverzögerungen bei Ladeinfrastrukturen und Fahrzeugen

Der bei den einzelnen Transportunternehmen vorgeschlagene Elektrifizierungsgrad, der auf der Ersatzbeschaffungsplanung der Dieselfahrzeuge basiert, setzt eine termingerechte Projektumsetzung inkl. Lieferung der Ladeinfrastrukturen und Fahrzeuge sowie Finanzierung voraus. Bei Verzögerungen müssten die Dieselsebusse länger im Einsatz bleiben, was im Rahmen von ein bis zwei zusätzlichen Jahren grundsätzlich möglich ist, jedoch zu erhöhtem Unterhaltsaufwand führen kann. Weil aber in den aufgezeigten Umsetzungskonzepten die Lebensdauer der heute im Einsatz stehenden Dieselsebusse teilweise bereits ausgereizt wurde, um nicht nochmals Dieselsebusse beschaffen zu müssen, könnten Projektverzögerungen im Extremfall nochmals Dieselsebusbeschaffungen bedeuten. In diesem Fall wäre das Ziel «2040 fossilfreier ÖV» u. U. nicht erreichbar.

Verzögerte Umsetzung einer fossilfreien Busflotte

Eine Verzögerung oder ein vorläufiger Verzicht auf die Umstellung auf eine fossilfreie Busflotte birgt folgende Risiken:

- Durch die geplante Aufhebung der Mineralölsteuer-Rückerstattung per 2030 verteuert sich der Dieselsebusbetrieb ohne Umweltnutzen.
- Die Verfügbarkeit von Dieselsebussen auf dem Markt wird in den nächsten Jahren zunehmend geringer. Denn verschiedene Fahrzeuglieferanten haben angekündigt ab dem Horizont 2030 keine Dieselsebusse mehr zu produzieren.
- Die im Rahmen der Revision des CO₂-Gesetzes vorgesehenen Fördermittel des Bundes für fossilfreie Antriebe im öffentlichen Busverkehr sind nur für eine beschränkte Zeitperiode 2026 bis 2030 möglich. Spätere Flottenumstellungen können nicht mehr davon profitieren, was die Gesamtumstellung verteuert.
- Ein Zuwarten mit der Umstellung auf eine fossilfreie Busflotte bzw. Beschaffungen von weiterhin Dieselsebussen könnte im Kontext der Klimadiskussionen die Reputation des VVL und der Transportunternehmen beeinträchtigen. Zudem wäre das im Planungsbericht Klima- und Energiepolitik des Kantons Luzern geforderte Ziel eines fossilfreien ÖV bis 2040 nicht erreichbar. Die Zielerreichung von netto Null 2040 wird unterdessen auch vom Klima- und Innovationsgesetz (KIG), welches im Jahr 2023 angenommen wurde, als Erwartung an die Kantone gerichtet.

Finanzierung der Mehrkosten

Die Finanzierung der Mehrkosten stellt ein Risiko dar, insbesondere wenn der Bund Einsparungen beim regionalen Personenverkehr durchsetzen sollte. Dies könnte die Umsetzung der Strategie beeinträchtigen und zusätzliche Herausforderungen bei der Finanzierung der Projekte mit

sich bringen. In diesem Kontext ist auch der Einfluss der Mehrkosten auf den Kostendeckungsgrad und damit der Mitfinanzierung durch den Bund noch vertiefter zu beleuchten.

Zusatzkosten Brandschutzmassnahmen

Es ist zurzeit noch unklar, welche Anforderungen für Batteriebusse aus Sicht Brandschutz bei Bauprojekten künftig gestellt werden. Daraus könnten zusätzliche Kosten entstehen. Das Thema ist momentan in der Branche noch in Diskussion. Es können noch keine verlässlichen Quantifizierungen gemacht werden.

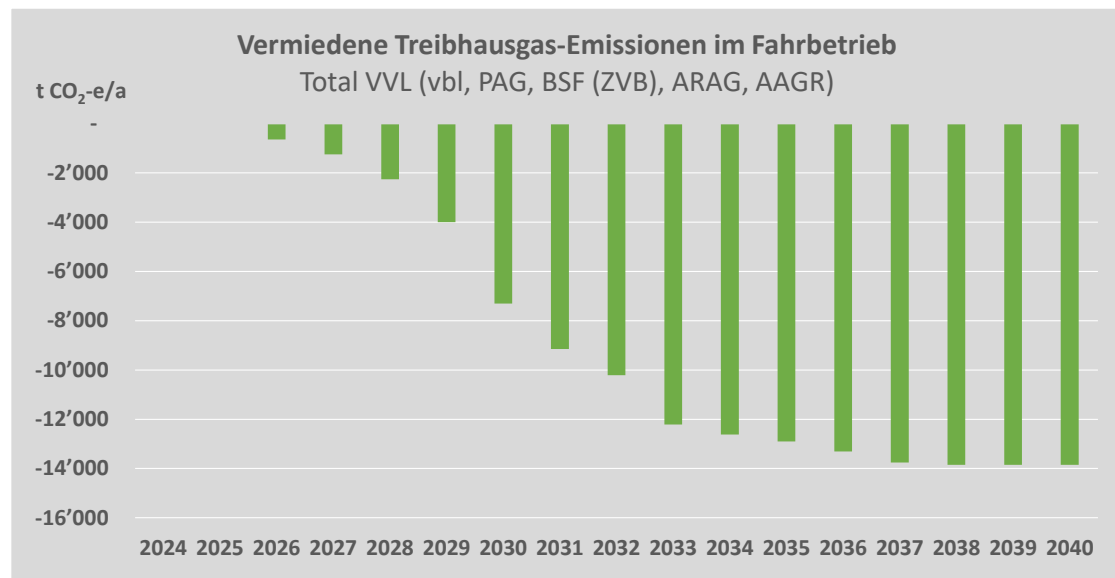
5. Nutzen einer fossilfreien Busflotte

5.1. Im Fahrbetrieb

Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen

Mit einer rein elektrischen Fahrzeugflotte können bei vollständiger Umstellung der Dieselflotten rund 14'000 Tonnen Treibhausgase vermieden werden. Dies entspricht rund 3 Mio. CHF externe Umweltkosten⁸ pro Jahr als Nutzen gegenüber den Mehrkosten.

Abbildung 26: Vermiedene Treibhausgase mit fossilfreier Busflotte als Nutzen gegenüber den Mehrkosten



Grafik INFRAS/OGS.

Vermeidung von Lärm und lokalen Luftschadstoffen

Nebst dem Klimanutzen durch vermiedenen Treibhausgasemissionen wirken sich die E-Busse positiv auf die Lärmsituation in den Siedlungsgebieten aus, speziell im Geschwindigkeitsbereich unter 30 km/h sowie in Steigungen. Zudem werden die lokalen Luftschadstoffe und Vibrationen in den Wohnquartieren markant reduziert.

⁸ 200 CHF/Tonne CO₂ in Anlehnung an myclimate/Klik

5.2. Weitere Massnahmen zur Vermeidung von Treibhausgasen

Auf Ebene der Transportunternehmen lassen sich mit folgenden, über den eigentlichen Fahrbetrieb hinausgehenden Massnahmen Treibhausgas-Emissionen vermeiden:

- Ausbildung des Fahrpersonals mit Blick auf einen energieeffizienten, ökologischen Fahrstil inkl. Fahrassistenzgeräte für das Fahrpersonal mit der Anzeige des aktuellen oder durchschnittlichen Energieverbrauchs,
- LED-Beleuchtungen,
- PV-Anlage auf den Depotdächern inkl. Speicheranlagen,
- Gebäudeheizungen mit fossilfreien Technologien (bspw. Wärmepumpen, Pellets oder Fernwärme) und zusätzliche Gebäudeisolationen,
- Umstellung der Dienst- und Firmenfahrzeugflotte auf fossilfreie Antriebe (Batteriefahrzeuge),
- Förderung einer nachhaltigen Mitarbeitenden-Mobilität sowie Förderung Laden von privaten Mitarbeitenden-Fahrzeugen.

6. Fazit und Umsetzung

6.1. Zusammenfassende Erkenntnisse

Aus der Aktualisierung der Strategie und den Umsetzungskonzepten lassen sich folgende wichtigsten Erkenntnisse zusammenfassen:

- Batteriebusse erfüllen die Prämisse «erneuerbar – effizient – emissionsarm» nach wie vor am besten. Die Erkenntnis, dass der Einsatz von Biotreibstoffen und e-Fuels (darunter auch Wasserstoff) im öffentlichen Busverkehr nicht zweckmässig ist, hat sich weiter verdichtet. Dies vor allem auch, weil sich Batteriebusse besser als erwartet weiterentwickelt haben.
- Die im 2019 eingeschlagene strategische Stossrichtung für eine fossilfreie Busflotte bis 2040 hat nach wie vor Gültigkeit und soll weiterverfolgt werden. Das bedeutet, dass neben der Weiterentwicklung des Trolleybusnetzes im Raum Luzern die Dieselbusflotte im gesamten VVL-Gebiet auf Depotlader-Batteriebusse umgestellt werden soll. Die Reichweiten von Depotladerbussen haben sich deutlich verbessert und werden sich gemäss aktuellen Prognosen weiter erhöhen.
- Die Umsetzungskonzepte auf Ebene der Transportunternehmen haben einerseits die technische Machbarkeit gezeigt (keine dezentrale Ladeinfrastruktur für die Umstellung des heutigen Angebots erforderlich), und andererseits bestätigt, dass das Ziel «2040 fossilfrei» erreichbar ist. Gemäss hergeleitetem Elektrifizierungsgpfad (basierend auf den aktuellen Fahrzeugbeschaffungsplänen) wird der letzte Dieselbus im Jahr 2038 ausser Betrieb genommen.
- Die Umstellung auf Depotlader-Batteriebusse erfordert zusätzliche Fahrzeuge. Bei sehr langen Tageseinsätzen müssen beim Einsatz von Elektrofahrzeugen mit gegenüber Dieselbussen limitierten Reichweiten zusätzliche Fahrzeuge eingeplant werden, die ein Nachladen im Depot auch untertags ermöglichen. Zudem sind die heute teilweise knappen Fahrzeugreserven zu erhöhen. Elektrobusse werden oft auch tagsüber zwischengeladen. Deshalb stehen sie im Unterschied zu Dieselbussen weniger für Wartungsarbeiten oder ungeplante Betriebseinsätze, Bahnersatz- oder andere Extraleistungen zur Verfügung.
- Grosse Herausforderung: Die Elektrifizierung der Depots zeigt ein grosses Erstinvestitionsvolumen bei praktisch allen TU zwischen 2026 und 2030. Die Transportunternehmen müssen die entsprechenden Projekte rasch konkretisieren und genehmigungsfähige Bau- und Umstellungsprojekte ausarbeiten. Bei mehreren Depotstandorten pro Transportunternehmen ist dazu im Vorfeld die Überprüfung des Status quo bzw. ein Depotkonzept erforderlich. Verzögerungen bei den Ladeinfrastrukturen bzw. Depotumbauten haben starke Abhängigkeiten zu den vorgesehenen Fahrzeugbeschaffungen bzw. zur Bestandsflotte und entsprechend grosse Folgerisiken.

- Die Elektrifizierung der Busflotte hat auch Auswirkungen auf die künftige Angebotsplanung. Die limitierten Reichweiten bzw. die Nachladedauer der Batteriebusse bildet eine zusätzliche Randbedingung für die Angebotskonzeption.
- Finanziell ergibt sich für den VVL ab 2026 ein sukzessiver Anstieg der Abgeltungen; mit Förderbeiträgen des Bundes für die Fahrzeugbeschaffung bei vollständiger Umstellung ca. + 6 Mio. CHF pro Jahr, was einer Steigerung von +18% entspricht (bei heutigem Angebot), ohne Fördermittel Bund ca. + 7.5 Mio. CHF pro Jahr (+23%). Beiträge aus dem Agglomerationsprogramm für die Ladeinfrastrukturen in den Depots sowie allfällige weitere Fördermittel würden die Mehrabgeltungen reduzieren. Die im Umsetzungskonzept hinterlegten Annahmen sind tendenziell konservativ; im Rahmen der konkreten Beschaffungen sind die Annahmen zu verifizieren.
- Der aufgezeigte Elektrifizierungspfad mit vollständig fossilfreier Flotte ab 2038 fusst auf den Ersatzbeschaffungsplänen der Transportunternehmen. Es wird erwartet, dass die TU periodisch Beschaffungsgruppen bilden. Wenn sich aus Finanzierungsgründen oder Projekt- bzw. Lieferverzögerungen dieser Pfad nicht so umsetzen lässt, bedeutet dies, dass Dieselbusse länger im Einsatz stehen. Im Extremfall müssten nochmals Dieselbusse beschafft werden, denn die Lebensdauer der heute im Einsatz stehenden Dieselbusse wurde teilweise bereits stark ausgereizt, um nicht nochmals Dieselbusse beschaffen zu müssen. In diesem extremen Fall wäre das Ziel «2040 fossilfreier ÖV» nicht erreichbar.

6.2. Genehmigungsprozess für Fahrzeuge und Infrastrukturen

Ebene Bund

Mit dem Inkrafttreten des neuen CO₂-Gesetzes (frühesten ab 1.1.2025) ändern sich die Prozesse auf Seiten des BAV. Für die Beschaffung von E-Bussen ist künftig kein Genehmigungs-gesuch nach Art. 19 ARPV mehr notwendig. Auch die Investitionsuntergrenze (3 Mio. CHF) entfällt; dies gilt auch für die Ladeinfrastrukturen.

Ebene VVL

Analog zum BAV ist künftig auch seitens VVL kein Genehmigungs-gesuch mehr notwendig. Künftig wird der VVL-Verbundrat der Beschaffung von E-Bussen und Ladeinfrastrukturen im Rahmen des Offertprozesses mit dem Angebotsbeschluss zustimmen. Dazu sind im Rahmen der Offerteingabe die geplanten Investitionen im Investitionsplan (mit Ausblick mind. für die nächsten 4 Jahre, d.h. zwei vollständige zweijährige Bestellverfahren) aufzuführen und im Begleitschreiben entsprechend zu erläutern. Das vorliegende Umsetzungskonzept dient als Basis, mit

rollender Anpassung im gegenseitigen Austausch zwischen dem Transportunternehmen und dem VVL. Der VVL behält sich vor, in begründeten Ausnahmefällen ein Gesuch durch die TU einzufordern (Entscheid durch VVL-VR).

Im Zusammenhang mit den Eingaben/Genehmigung von Investitionen ist von Seiten VVL Flexibilität in Bezug auf den Detaillierungsgrad der Unterlagen, v.a. Kostengenauigkeit, gefragt. Dies gilt insbesondere für die Massnahmen für Umstellungen per 2027/2028, die bereits im Angebotsbeschluss 2024 genehmigt werden müssen.

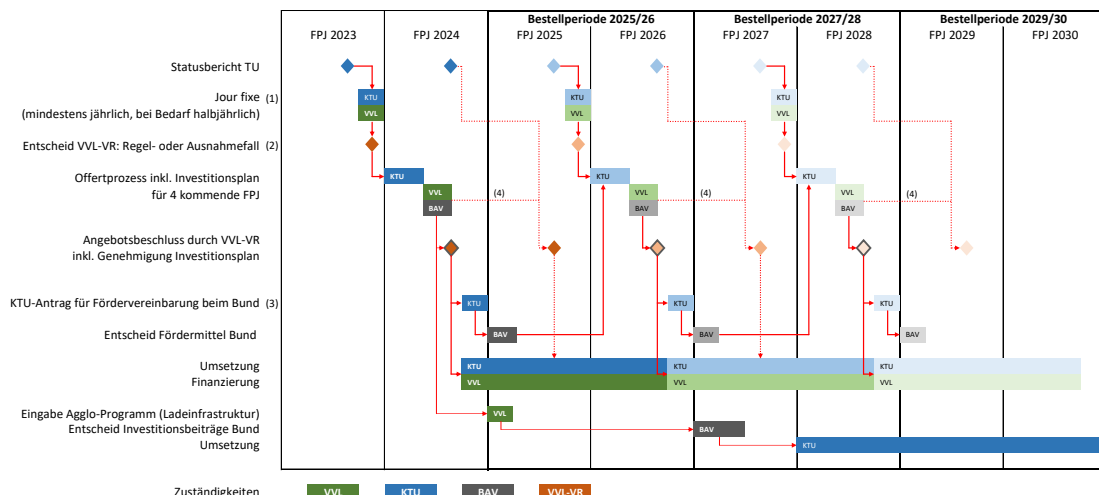
Fördermittel

Ein Gesuch braucht es künftig, um voraussichtliche **Fördermittel für Fahrzeuge gemäss dem neuen CO₂-Gesetz** beim Bund zu beantragen. Voraussetzung ist eine Freigabe beim VVL im Rahmen des Angebotsbeschluss durch den Verbundrat. Basierend darauf schliessen die Transportunternehmung und das BAV eine Fördervereinbarung ab. Hierfür wird vom BAV ein neuer Prozess definiert.

Fördermittel für Ladeinfrastrukturen können via Kanton bzw. VVL über die Agglomerationsprogramme beantragt werden (wenn im entsprechenden Bearbeitungsperimeter und in passenden Zeithorizonten).

Die folgende Abbildung zeigt den Genehmigungsprozess für die Fahrzeug- und Ladeinfrastrukturinvestitionen im Überblick.

Abbildung 27: Genehmigungsprozess für Fahrzeuge und Ladeinfrastrukturen



(1) Basis ist das Umsetzungskonzept „Fossilfreier öV 2040“ mit rollender Anpassung im gegenseitigen Austausch KTU-VVL; In der ersten Runde erfolgt die Festlegung noch auf Basis der Teilberichte
 (2) Nur in begründeten Ausnahmefällen verlangt der VVL-VR ein Betriebsmittelgesuch
 (3) Neuer Prozess vom Bund vorgesehen => folgt
 (4) Angebotsbeschluss erfolgt jährlich, mit oder ohne Anpassung Offerten

Im Annex 3 befindet sich eine vergrösserte Darstellung.

Grafik INFRAS/OGS. Quelle: VVL

6.3. Monitoring der Umstellung auf fossilfreie Busse

Das Ziel eines fossilfreien öffentlichen Verkehrs bis 2040 kann erreicht werden, wie der vorliegende Bericht ausführt. Als Taktgeber der Umstellung dient der im vorangegangenen Kapitel dargestellte, zweijährige Bestellrhythmus mit dem entsprechenden Angebotsbeschluss unter der Leitung des VVL.

Statusbericht TU und Jour fixe

Für die Lenkung der Umstellung auf fossilfreie Busse sollen mindestens jährliche Gespräche (Jour fixe) mit den Transportunternehmen stattfinden, welche die nächste Offertperiode bzw. den jeweils nächsten Angebotsbeschluss vorbereiten. Basis für diese Gespräche bildet ein Statusbericht, welcher vom TU jeweils eine Woche vor den Sitzungen dem VVL zugestellt werden soll. Er enthält mindestens:

- Feststellen der seit dem letzten Statusbericht vollzogenen Veränderungen im Fahrzeugpark, bei der Ladeinfrastruktur und an den Depotgebäuden und Abbildung des aktuellen Bestands der Flotte und Ladeinfrastruktur
- Stand laufende Projekte bzw. Arbeiten gemäss Massnahmenliste
- Ausblick auf weitere Umsetzungsschritte als Vorbereitung zur Aufnahme in Investitionsplan in Offerte
- Finanzierungsbedarf beim nächsten Angebotsbeschluss
- Zusammenarbeit mit anderen TU (bspw. Beschaffungen, Unterhalt, etc.)
- Besonderheiten / Bemerkungen aus Sicht TU

Die Traktanden für die Jour fixe-Sitzungen sind entsprechend:

- Erläuterungen zum Statusbericht der TU
 - Anpassungsbedarf an der Fahrzeugdatenbank
- Anpassungsbedarf der Massnahmenliste
 - Fahrzeugbeschaffungen (allenfalls mehrere TU miteinander)
 - Investitionen in Ladeinfrastruktur (allenfalls mehrere TU miteinander)
 - Anpassen von Depotinfrastrukturen (Bauliches, Stromzuführung, usw.)
- Nächste Schritte, nächste Sitzung

Als Abschluss der Sitzungen und als Bestätigung der Massnahmen stellt der VVL der TU die angepasste Massnahmenliste zu.

Für die kommenden, intensiven 10 Jahre werden halbjährliche Jour fixe empfohlen. Zum einen ist die Dynamik im E-Bus-Sektor sehr hoch (techn. Entwicklungen, neue Anbieter, Preise, usw.).

Zum anderen sind die von den TU zu liefernden, genehmigungsfähigen Unterlagen anspruchsvoll; eine enge Begleitung mit Vorgesuchten bzw. Vorgesprächen ist sinnvoll, um Überraschungen oder «Feuerwehübungen» zu vermeiden.

Führungswerkzeuge

Für die inhaltliche Steuerung der Umstellung und die Begleitung von Massnahmen führt der VVL zwei wichtige Instrumente:

- Fahrzeugdatenbank (alle Diesel- und Elektrofahrzeuge von allen TU)
- Massnahmenliste pro TU

Monitoring VVL

Es wird, auf Basis der Standberichte der TU, mindestens ein jährlicher Rückblick und Ausblick über den Verlauf der Elektrifizierung empfohlen (Cockpit und kurzer Bericht). Dieser dient als interne Entscheidungsgrundlage für den VVL sowie möglicherweise als Grundlage für eine Kommunikationskampagne, welche die Umstellung begleiten könnte (bspw. wie in den letzten Jahren bereits im Geschäftsbericht abgebildet).

Annex

Annex 1: Best Practices in der Schweiz

Kanton Graubünden (Postauto AG)

- Januar 2023: vier von insgesamt elf Batteriefahrzeugen im regulären Einsatz
- Kombilader: Laden im Depot und am Bahnhof via Pantograph down
- PAG CH: Bis 2024 100 fossilfreien Postautos, bis 2040 ganze Flotte



Basel (Basler Verkehrs-Betriebe, BVB)

- Bussystem 2027: Umstellung gesamte Busflotte auf batterieelektrische Busse (E-Busse) bis 2027 (gesetzliche Vorgabe!)
- Ab 2023: 65 E-Busse, 2027: weitere 61 E-Busse
- Kombilader, primär aber Depotladung
- E-Busse von Hess AG und EvoBus AG
- Kosten Normalbus (eCitaro): ca. 0.8 Mio. CHF
- Kosten E-Doppelgelenkbus: ca. 1.7 Mio CHF



Schaffhausen (Verkehrsbetriebe Schaffhausen)

- Ziel: komplette Ablösung Dieselbusse bis 2028 (Stadtverkehr)
- Aktuell: 15 E-Busse «ie tram», Gelegenheitslader
- bereits 750'000 Kilometer Fahrleistung und 60'000 Schnellladungen
- Buslieferant: Irizar e-mobi
- Kosten total: ca. 24 Mio. CHF
- Machbarkeitsstudie Elektrifizierung RPV → Depot + Kombilader



Neuchâtel (transN)

- Aktuell: 32 Trolleybusse
- Ab 2024: 30 Batterie-Trolleybusse von Hess AG (Ersatz älteste Trolleybusse)
- Kosten: ca. 33 Mio. CHF (+ 10 Mio. für Infrastruktur)
- Weitere Ersatzetappen vorgesehen



St.Gallen (Verkehrsbetriebe St.Gallen, VBSG)

- Aktuell: 87 Busse, davon 24 Trolleybusse, 17 Batterie-Trolleybusse, 1 Batteriebus
- Ab 2023: 13 Batteriebusse (Depotladung)
- Bis 2024: 31 neue Elektrobusse für 42 Mio. CHF inkl. Lade-Infrastruktur (u.a. Batterie-Trolleybusse)
- Busse von Hess AG und Solaris



Zürich (Verkehrsbetriebe Zürich, VBZ)

- Aktuell: 83 Trolleybusse
- Bis 2023: 40 batterieelektrisch angetriebene Busse, um herkömmlichen Dieselbusse zu ersetzen
- Kosten: 14 Mio. CHF für 15 Elektrobusse
- Bis 2030: Ersetzen Dieselbusse durch > 100 Elektrobusse
- Busse von Hess AG und MAN
- Depotladung (45 Ladestationen von Siemens)



Bern (BERNMOBIL)

- Aktuell: 28 Trolleybusse & 5 Elektrobusse, alle von Hess AG
- Schnellladestation (Opportunity Charging)
- Anfang 2023: Umstellung weiterer Linien auf Elektrobusbetrieb (14 Busse von Irizar, Schnelllader)
- Kosten drei Schnellladestationen inkl. der Ladeinfrastruktur in Garage ca. 2 Mio. CHF

**Genf (TPG)**

- 2030: kompl. Ersetzung Dieselbusse durch Elektrobusse
- Aktuell: 113 Trolleybusse & 12 Elektrobusse
- Geplant: 19 Trolleybusse & 285 Elektrobusse
- Kosten: ca. 700 Mio. CHF
- Schnellladetechnologie (Opportunity Charging)



Annex 2: Dezentrale Ladeinfrastrukturen – Positionspapier VVL



Fossilfreier ÖV

Haltung VVL zum Ausbau von Bushubs bzgl. Ladeinfrastrukturen

Generell

Der VVL setzt gemäss der Strategie fossilfreier ÖV auf den Einsatz von Depotlader-Batteriebusen. Nach dem heutigen Stand sind im Grundsatz keine Zwischenladungen auf der Strecke vorgesehen, sondern ausschliesslich in den Depots. Das heutige Angebot kann mit Umlafoptimierungen und Zwischenladungen tagsüber im Depot gefahren werden. Dafür sind zusätzliche Fahrzeuge notwendig, um das bestehende Angebot vollständig fahren und eine genügende Reserve bereithalten zu können. Die prognostizierten Reichweiten der Batterien werden zunehmen, allenfalls sinkt dadurch der Fahrzeugbedarf langfristig.

Bahnersatz- oder andere Extraleistungen werden in der Strategie fossilfreier ÖV nicht betrachtet. Fakt ist, dass diese Leistungen teilweise sehr lange Einsatzzeiten aufweisen und heute meist aus dem Reservepool der Dieselsebusse betrieben werden. Dies ist künftig nicht oder nur noch teilweise möglich, weil im Depot stehende Busse in dieser Zeit nachgeladen werden.

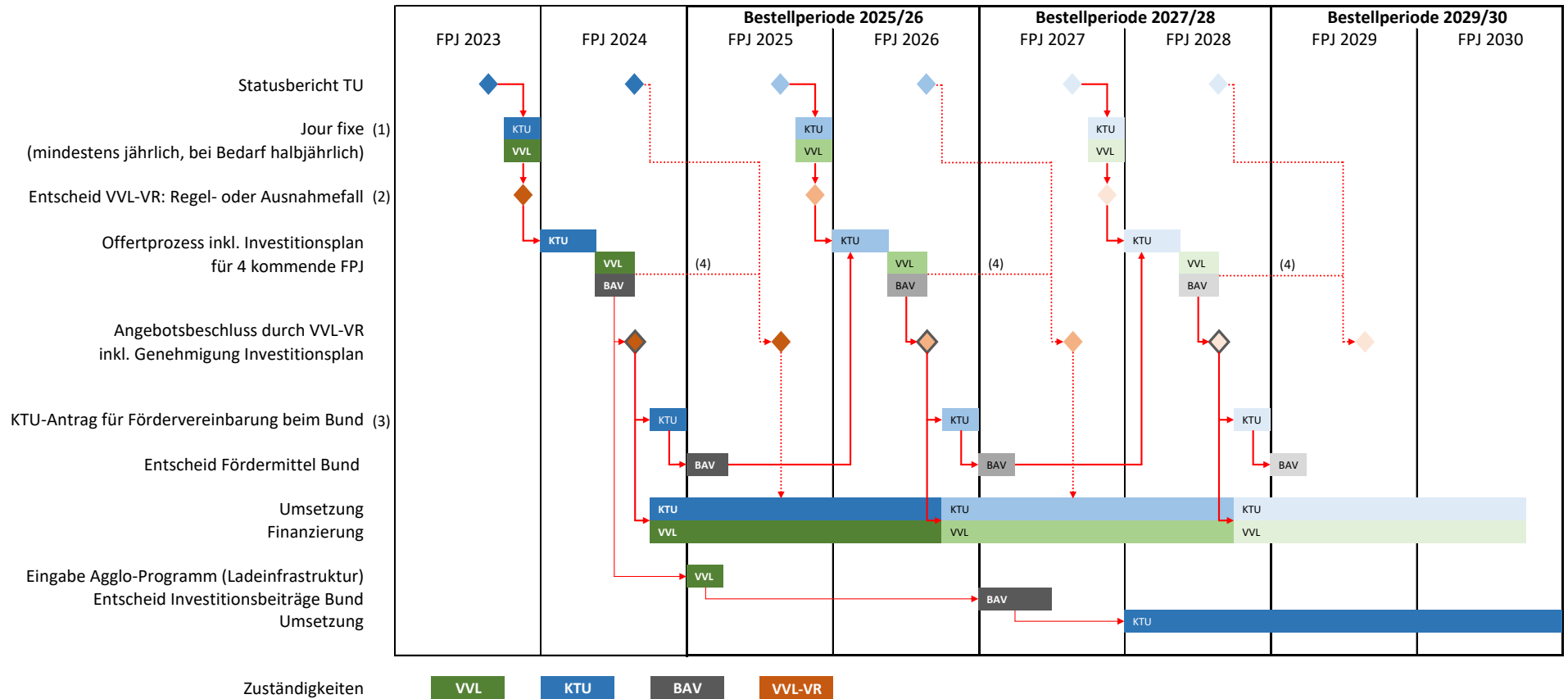
Zusätzliche Zwischenlademöglichkeiten an Bushubs, wo einerseits mehrere Linien zusammenkommen oder topographische Gründe dafürsprechen, andererseits typischerweise Bahnersatz- und Extraleistungen beginnen oder enden, können hier eine zweckmässige Ergänzung zur Depotladung darstellen. Diese ermöglichen es auch, bei Bedarf reguläre Linienbusse in Einsatzpausen zwischenzuladen.

Ausbau / Neubau von Bushubs im Kanton Luzern

In den nächsten Jahren werden an verschiedenen Orten im Kanton Luzern Bushubs neugestaltet oder umgebaut. Hier empfiehlt der VVL folgende Punkte bei denjenigen Standorten, wie im vorherigen Absatz beschrieben, zu berücksichtigen:

- Der potentielle Ausbau von Ladeinfrastruktur (Trafo, Gleichrichter, Ladepunkte) sollte im Rahmen eines Umbaus berücksichtigt werden. Dadurch soll eine teure Nachausrüstung vermieden werden, falls ein Bushub tatsächlich mit einer Ladeinfrastruktur ausgerüstet werden soll (bspw. wenn die Erfahrungen zeigen, dass eine Zwischenladung am Linienende oder für Bahnersatz- und Extraleistungen sinnvoll wäre). Im Vordergrund stehen Bushubs, die von mehreren Buslinien angefahren werden oder Bahnersatzleistungen fahren.
- Das Laden der Busse muss gemäss der Strategie fossilfreier ÖV in jedem Fall mit einer Steckerlösung gegeben sein. Der Ausbau einer Ladeinfrastruktur für eine Ladung via Pantographen kann ergänzend geprüft werden (in Absprache mit dem VVL und der/den betreffenden Transportunternehmen).
- Die Verlegung von Leerrohren bis zur Buskante hin sind vorzusehen.
- An den Buskanten ist entsprechender Platz für eine Ladesäule vorzusehen.
- Auch der Platz für Gleichrichter und Traforaum sind zu berücksichtigen.
- Wenn neben den Haltekanten zusätzlich auch Gebäude baulich angepasst/neu gebaut werden, ist dort entsprechender Platz für Traforaum und Gleichrichter vorzuhalten. Dies am besten unterirdisch (im Keller, Garage, etc.).
- Die Kosten sind bei der Finanzierung der Bushubs zu berücksichtigen (Infrastruktur-Finanzierung).
- Wenn die Kosten und/oder der Aufwand für diese empfohlenen Vorinvestitionen zu gross eingeschätzt werden, soll gemeinsam mit dem VVL die Diskussion über einen allfälligen Verzicht dieser Vorinvestitionen geführt werden (aus Gründen der Verhältnismässigkeit).

Annex 3: Genehmigungsprozess für Investitionen



- (1) Basis ist das Umsetzungskonzept „Fossilfreier öV 2040“ mit rollender Anpassung im gegenseitigen Austausch KTU-VVL; In der ersten Runde erfolgt die Festlegung noch auf Basis der Teilberichte
 (2) Nur in begründeten Ausnahmefällen verlangt der VVL-VR ein Betriebsmittelgesuch
 (3) Neuer Prozess vom Bund vorgesehen => folgt
 (4) Angebotsbeschluss erfolgt jährlich, mit oder ohne Anpassung Offerten

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Europäische E-Bus-Marktführer in Europa _____	10
Abbildung 2: Verkaufsanteil emissionsfreier Busse 2022 in der EU _____	11
Abbildung 3: Entwicklung Neuzulassungen und Bestand von Batteriebusen in der Schweiz ____	12
Abbildung 4: Anzahl registrierte Elektrobusse inkl. Trolleybusse in der Schweiz, März 2023 ____	12
Abbildung 5: Ladekonzepte für Batteriebusse _____	13
Abbildung 6: Übersicht Standardisierung für das konduktive Laden über Plug-In-System _____	14
Abbildung 7: Entwicklung Kosten und Energiedichten von Batterien _____	16
Abbildung 8: Angenommene Entwicklung der Reichweite von Standard- und Gelenkbusen ____	18
Abbildung 9: Einsatzbereiche sauberen Wasserstoffs _____	19
Abbildung 10: Energieeffizienz verschiedener Treibstoff- bzw. Antriebsoptionen (Well-to-Wheel) _____	20
Abbildung 11: Überblick Best Practices in der Schweiz _____	21
Abbildung 12: Gelenkbus-Tageseinsätze 2023 im VVL (vbl, PAG, ARAG, AAGR, BSF/ZVB) _____	27
Abbildung 13: Illustratives Simulation-Modell «Nachladen von Fahrzeugen bei ungenügenden Reichweiten» _____	27
Abbildung 14: Elektrifizierungspfad VVL 2024 bis 2040 (vbl, PAG, ARAG, AAGR, BSF/ZVB) _____	29
Abbildung 15: Elektrifizierungspfad VVL nach Fahrzeugtyp 2024 bis 2040 _____	30
Abbildung 16: Geplante Inbetriebnahme von Batteriefahrzeugen im VVL (Anzahl pro Jahr) ____	31
Abbildung 17: Investitionen für Fahrzeugbeschaffungen und Folgekosten pro Jahr _____	34
Abbildung 18: Investitionen in den Depots (inkl. Werkstatt und IT) und Folgekosten pro Jahr __	36
Abbildung 19: Eingesparte Energiekosten E-Busse mit Aufhebung Mineralölsteuer-Rückerstattung ab 2030 _____	38
Abbildung 20: Betriebliche Mehrkosten durch zusätzliche Fahrzeug-Austauschfahrten _____	39
Abbildung 21: Mehrabgeltungen Bund, VVL und Nachbarkantone, Übersicht Einzeleffekte pro Jahr _____	41
Abbildung 22: Mehrabgeltungen Bund, VVL und Nachbarkantone (kumuliert) ohne und mit Förderbeiträge an die E-Busbeschaffung _____	42
Abbildung 23: Mehrabgeltungen VVL (kumuliert) ohne Förderbeiträge an die E-Busbeschaffung	44
Abbildung 24: Mehrabgeltungen VVL (kumuliert) mit Förderbeiträge an die E-Busbeschaffung	45
Abbildung 25: Auswirkungen verschiedener Sensitivitäten auf die Mehrabgeltungen für den VVL _____	47
Abbildung 26: Vermiedene Treibhausgasse mit fossilfreier Busflotte als Nutzen gegenüber den Mehrkosten _____	51
Abbildung 27: Genehmigungsprozess für Fahrzeuge und Ladeinfrastrukturen _____	55

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Annahmen zu Batteriekapazitäten im Jahr 2023 _____	17
Tabelle 2: Annahmen zum spezifischen Energieverbrauch pro km im Jahr 2023 _____	17
Tabelle 3: Auswirkungen verschiedener Sensitivitäten auf die Mehrabgeltungen für den VVL__	46

Glossar

AAGR	Auto AG Rothenburg
ARAG	Rottal Auto AG
BSF	Busbetrieb Seetal-Freiamt (beauftragt von der ZVB)
CO ₂ -e	CO ₂ -Äquivalent
FPJ	Fahrplanjahr
GB	Gelenkbus 18m
Midi	Midibus 10.5m
Mini	Minibus 9m
SB	Standardbus 12m
PAG	PostAuto AG
PV	Photovoltaik-Anlage
TU	Transportunternehmen
vbl	Verkehrsbetriebe Luzern
ZVB	Zugerland Verkehrsbetriebe