



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

**Bundesamt für Verkehr BAV**  
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050  
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

# Elektrifizierung von Bussen in ländlichen Bergregionen

Schlussbericht



**Ralf Kollegger, Engadin Bus (Teil der Bus und Service AG)**

Plazza da la Staziun 6, 7500 St. Moritz, ralf.kollegger@bus-ag.ch, www.engadinbus.ch

**Patrik Casagrande, St. Moritz Energie**

Via Signuria 5, 7500 St. Moritz, patrik.casagrande@stmoritz-energie.ch, www.stmoritz-energie.ch

**Hendrik Clausdeinken, EBP Schweiz AG**

Zollikerstrasse 65, 8702 Zollikon, hendrik.clausdeinken@ebp.ch, www.ebp.ch

**Silvan Rosser, EBP Schweiz AG**

Zollikerstrasse 65, 8702 Zollikon, silvan.rosser@ebp.ch, www.ebp.ch

**Peter de Haan, EBP Schweiz AG**

Zollikerstrasse 65, 8702 Zollikon, peter.dehaan@ebp.ch, www.ebp.ch

## **Impressum**

Herausgeberin:  
Bundesamt für Verkehr BAV  
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)  
CH-3003 Bern

Programmverantwortung  
Tristan Chevroulet (BAV)

Projektnummer: P-196  
Bezugsquelle:  
Kostenlos zu beziehen über  
[www.bav.admin.ch/energie2050](http://www.bav.admin.ch/energie2050)

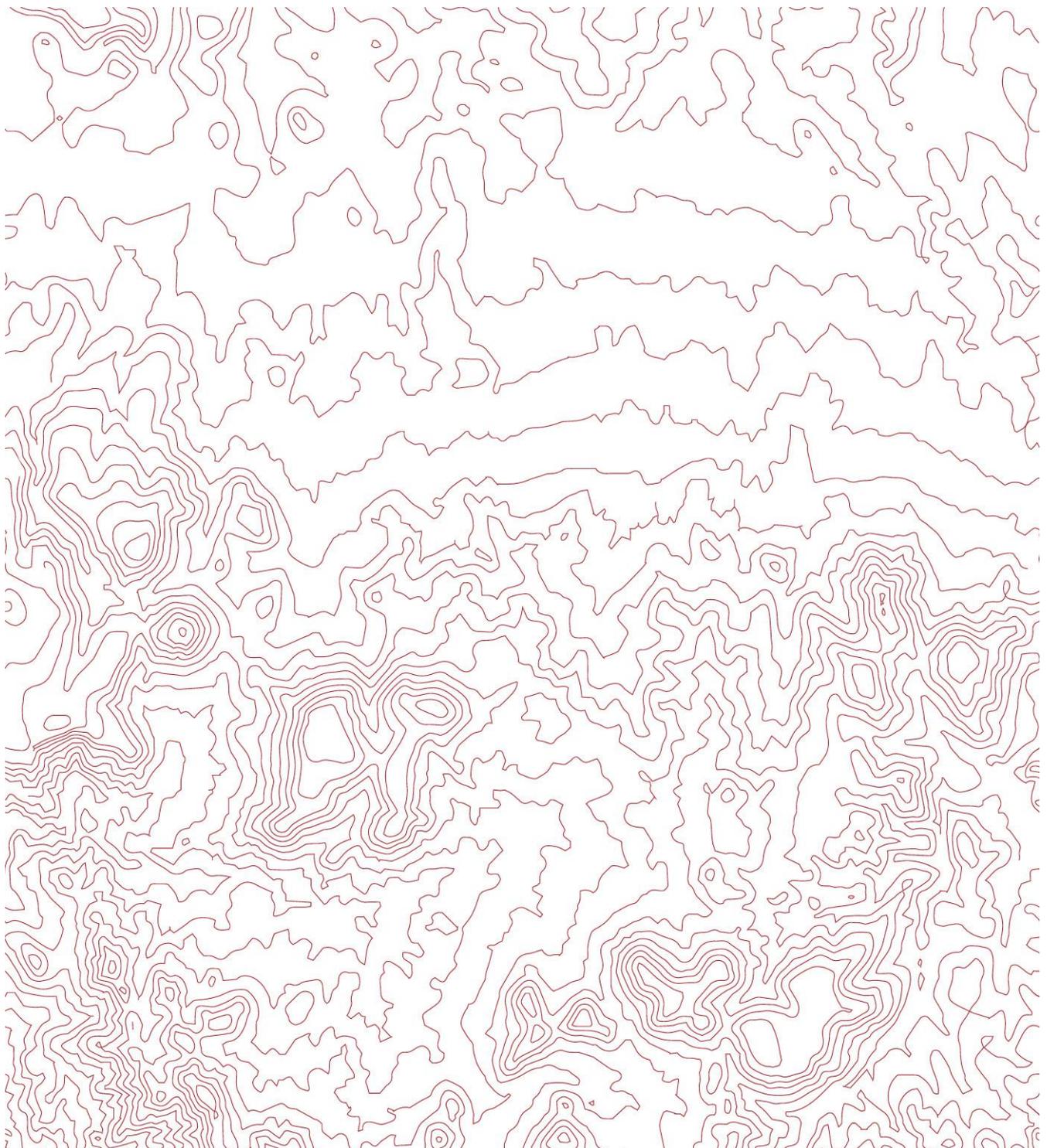
Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 29.10.2020

# Elektrifizierung von Bussen in ländlichen Bergregionen

Schlussbericht (ESöV P-196)

29.10.2020



### **Auftraggeber**

Engadin Bus  
St. Moritz Energie

### **Projektnehmer**

#### EBP

Hendrik Clausdeinken  
Silvan Rosser  
Peter de Haan

#### Paul Scherrer Institut, Laboratory for Energy System Analysis

Christopher Mutel  
Christian Bauer

Bei Rückfragen wenden Sie sich gerne an:

EBP Schweiz AG  
Zollikerstrasse 65  
8702 Zollikon  
Schweiz  
Telefon +41 44 395 11 11  
info@ebp.ch  
www.ebp.ch

## Executive Summary (deutsch)

Ländlich-touristische Bergregionen sind direkt durch den Klimawandel betroffen und haben somit ein besonderes Interesse Klimaschutz zu betreiben. Im öffentlichen Verkehr mit Linienbussen, bei dem heute Dieselsebusse eingesetzt werden, besteht grosses Potenzial Treibhausgasemissionen einzusparen. Eine Umstellung auf alternative Antriebssysteme wie Batterie, Hybrid oder Wasserstoff-Brennstoffzelle ist dabei eine zentrale Massnahme. Busbetriebe in ländlich-touristischen Bergregionen müssen sich dabei aber im Vergleich zu städtischen Regionen spezifischen Herausforderungen stellen. Unter Berücksichtigung dieser Herausforderungen betrachtet die vorliegende Studie die Umstellung auf eine Flotte aus Batteriebusen aus technischer, ökologischer und wirtschaftlicher Perspektive. Zugleich zeigt sie ein methodisches Vorgehen für einen Wechsel auf alternative Busantriebe auf.

Aus *technischer Perspektive* ist eine 100%-Elektrifizierung mit Batteriebusen trotz der extremen Anforderungen des Fahrbetriebs und der Klimatisierung/ Heizung möglich. Voraussetzung dafür ist die Nutzung von Streckenladern und der Einbau von Zusatzheizungen in den Fahrzeugen. Zusatzheizungen mit (Bio-)Diesel oder Bioethanol können eine technische Lösung für kurze, extreme Kältezeiten während des Winters sein und die nötige Batteriekapazität der Busse erheblich entlasten.

Aus *ökologischer Perspektive* ist ein Umstieg auf alternative Busantriebe sehr vorteilhaft und kann bis zu 90% der Treibhausgasemissionen reduzieren. Beim elektrischen Laden sollte auf einen erneuerbaren Strommix gesetzt werden, um das gesamte ökologische Potenzial zu nutzen. Zugleich kann zur Erleichterung einer Flottenelektrifizierung auf Zusatzheizungen gesetzt werden, da trotz der Verbrennung signifikante Reduktionen von mindestens 70% der Treibhausgasemissionen gegenüber Dieselsebussen erzielt werden können.

Aus *wirtschaftlicher Perspektive* ist die Anzahl an Streckenladern geringzuhalten und eine hohe Auslastung pro Streckenlader anzustreben. Dadurch können die hohen Investitionskosten und Leistungspreise für den Strombezug reduziert werden. Zugleich sollten Massnahmen ergriffen werden, um Leistungsspitzen beim elektrischen Laden zu reduzieren.

Insgesamt empfiehlt sich in ländlich-touristischen Bergregionen die zumutbaren Mehrkosten des Gesamtsystems gegenüber Dieselsebussen frühzeitig abzuklären und auch eine teilelektrische Flotte nicht auszuschliessen. Etwa ein Drittel der Tageseinsätze der Busse lassen sich ohne Streckenlader elektrifizieren und können bereits deutliche Reduktionen von Treibhausgasemissionen bewirken.

## Executive Summary (English)

Rural-touristic mountain regions are directly affected by climate change and therefore have a special interest in climate protection. In public transport, where today diesel buses are used, there is a great potential to reduce greenhouse gas emissions. A shift of bus drives to alternative systems such as batteries, hybrids or hydrogen fuel cells is a key measure in this context. However, bus companies in rural-touristic mountain regions face specific challenges compared to urban regions. Taking these challenges into account, this study examines the conversion to a fleet of battery-powered buses from a technical, ecological and economic perspective. At the same time, it shows a methodical procedure for a shift to alternative bus drive systems.

From a *technical perspective*, 100% electrification with battery-powered buses is possible despite the extreme demands of the driving operation and air conditioning/heating. A prerequisite for this is the use of opportunity chargers and the installation of auxiliary heating systems in the buses. Auxiliary heaters with (bio-)diesel or bioethanol can be a technical solution for short, extreme cold periods during winter and considerably reduce the necessary total battery capacity of the buses.

From an *ecological perspective*, a shift to alternative bus drives is very advantageous and can reduce greenhouse gas emissions by up to 90%. For electric charging, a renewable energy mix should be used to realize the full ecological potential. At the same time, auxiliary heaters can be used to facilitate electrification of the bus fleet, since reductions of at least 70% of greenhouse gas emissions can still be achieved compared to diesel buses, despite combustion.

From an *economic perspective*, the number of opportunity chargers should be kept at a minimum and a high utilization per opportunity chargers should be aimed for. This reduces the high investment costs and power prices (CHF/kW) for electric charging. At the same time, measures should be taken to reduce power peaks during electric charging.

Overall, it is suggested to clarify the reasonable additional costs of the overall system compared to diesel buses in rural-touristic mountain regions at an early stage. At the same time, the option of a partially electric bus fleet should not be excluded. About one third of the daily bus operations can be electrified without opportunity chargers and can already result in significant reductions of greenhouse gas emissions.

## Résumé exécutif français

Les régions rurales de montagne à vocation touristique sont directement touchées par le changement climatique et ont donc un intérêt particulier à œuvrer en faveur de la protection du climat. Les transports publics exploitant des lignes d'autobus roulant au diesel recèlent un important gisement de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'adoption de systèmes de propulsion alternatifs, tels que les batteries, les moteurs hybrides ou les piles à hydrogène, est l'une des mesures clés allant dans ce sens. Néanmoins, les compagnies de bus des régions rurales de montagne à vocation touristique doivent faire face à des défis spécifiques, différents de ceux des régions urbaines. Avec ces problématiques spécifiques en toile de fond, la présente étude examine le passage à une flotte de bus électriques (à batteries) d'un point de vue technique, écologique et économique. Dans le même temps, elle met en lumière une procédure méthodique pour l'adoption de systèmes alternatifs de propulsion pour les bus.

D'un *point de vue technique*, l'électrification totale de la flotte de bus (bus à batteries) est réalisable en dépit des exigences extrêmes liées à la conduite et au système de climatisation/chauffage. L'une des conditions préalables pour cela est l'utilisation de stations de recharge sur le parcours et l'installation de chauffages d'appoint à bord des véhicules. Les chauffages d'appoint au (bio)diesel ou au bioéthanol peuvent s'avérer une solution technique viable pour les brèves périodes de froid extrême en hiver et épargner dans une large mesure les capacités de batterie requises pour faire rouler les bus.

D'un *point de vue écologique*, le passage à des systèmes de propulsion alternatifs pour les bus est très avantageux et permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre jusqu'à 90 %. Côté recharge électrique, un mix énergétique renouvelable s'avère judicieux pour exploiter tout le potentiel écologique. Dans le même temps, le recours à des chauffages d'appoint peut s'avérer opportun pour faciliter l'électrification des flottes de véhicules, dans la mesure où, malgré la combustion, les émissions de gaz à effet de serre peuvent être considérablement réduites (d'au moins 70 %) par rapport aux bus roulant au diesel.

D'un *point de vue économique*, il convient de maintenir le nombre de stations de recharge sur le parcours aussi bas que possible tout en visant un taux d'utilisation élevé de chacune d'entre elles. Cela permettra d'abaisser les coûts d'investissement et les prix de puissance de l'électricité consommée, encore trop élevés. Dans le même temps, des mesures doivent être prises afin de réduire les pics de consommation lors de la recharge des batteries.

D'une manière générale, on ne peut que recommander, dans les régions rurales de montagne à vocation touristique, de clarifier très en amont la question des surcoûts raisonnables pour le système dans son ensemble par rapport aux coûts des bus roulant au diesel, sans exclure l'option d'une flotte de véhicules partiellement électrique. Environ un tiers des services quotidiens effectués par les bus peuvent être électrifiés sans la présence de stations de recharge sur le parcours et permettre à eux seuls des réductions substantielles des émissions de gaz à effet de serre.

# Inhaltsverzeichnis

Executive Summaries	3
Executive Summary (deutsch)	3
Executive Summary (English)	4
Résumé exécutif français	5
Zusammenfassungen	7
Zusammenfassung	7
English summary	11
Résumé français	15
1. Ausgangslage und Herausforderungen der ländlich-touristischen Bergregionen	20
2. Methodisches Vorgehen	21
3. Technologieoptionen	22
3.1 Alternative Busantriebe	22
3.2 Heiz- und Klimatisierungstechnologien	27
4. Technische Bewertung: Flottenmodellierung	29
4.1 Konzept der Flottenmodellierung	30
4.2 Einsatzsituation und Betriebsdaten	31
4.3 Modellierung und Energiebilanzierung	32
4.4 Erkenntnisse für ländlich-touristische Bergregionen	34
5. Ökologische Bewertung: Lebenszyklusanalyse	36
5.1 Konzept der Lebenszyklusanalyse	36
5.2 Dimensionen und Parameter der Lebenszyklusanalyse	36
5.3 Erkenntnisse für ländlich-touristische Bergregionen	37
6. Wirtschaftliche Bewertung: Investitionsrechnung	42
6.1 Konzept der wirtschaftlichen Bewertung	42
6.2 Eingangsgrößen zur wirtschaftlichen Bewertung	42
6.3 Erkenntnisse für ländlich-touristische Bergregionen	44
7. Handlungsempfehlungen	47
Abkürzungsverzeichnis	49
Literaturverzeichnis	50

## Zusammenfassung

Ländlich-touristische Bergregionen spüren unmittelbar den Einfluss des Klimawandels (z.B. auf ihr zukünftiges Tourismusangebot aufgrund kürzerer Skisaisons), so dass die Sensibilisierung zunimmt, aktiven Klimaschutz vor Ort zu betreiben. Es stellt sich die Frage, welche Rolle der öffentliche Verkehr (ÖV) bei der Reduktion von Treibhausgasemissionen spielen kann, da heutzutage mehrheitlich Dieselsebusse zur Erbringung von Orts- und Regionalverkehr eingesetzt werden.

Eine Umstellung von Dieselsebussen auf alternative Antriebssysteme (Batterie, Hybrid, oder Wasserstoff-Brennstoffzelle) ist ein zentraler Hebel für aktiven Klimaschutz. Busbetriebe in ländlich-touristischen Bergregionen müssen sich dabei im Vergleich zu städtischen Regionen spezifischen Herausforderungen stellen:

- Starke saisonale Nachfrageschwankungen im ÖV
- Grosse klimatische Schwankungen über das Jahr (etwa  $-25^{\circ}\text{C}$  bis  $+30^{\circ}\text{C}$ ) und damit verbundene Klimatisierungs-/Heizbedarfe
- Schneefall und intensive Strassensalzung im Winter
- Buslinien mit grossen Steigungen
- Grosse Fahrleistungen und lange Tageseinsätze der Busse

Der folgende Leitfaden zeigt für den spezifischen Buseinsatz in ländlich-touristischen Bergregionen auf, wie unter Berücksichtigung dieser Herausforderungen eine Umstellung auf alternative Antriebssysteme aus technischer, ökologischer und wirtschaftlicher Perspektive möglich ist und gelingen kann.

Trotz der Unterschiede der Einsatzsituationen von Linienbussen in den verschiedenen Bergregionen der Schweiz, liessen sich allgemeine Erkenntnisse für ländlich-touristische Bergregionen aus dem vorliegenden Projekt gewinnen.

### **Technische Erkenntnisse für ländlich-touristische Bergregionen**

#### *100%-Elektrifizierung ist technisch möglich*

Trotz der extremen Anforderungen des Fahrbetriebs und der Klimatisierung/Heizung ist eine vollständige Elektrifizierung der Fahrzeugflotte in Bergregionen technisch möglich. Voraussetzung dafür ist die Nutzung von Streckenladern und der Einbau von Zusatzheizungen in den Fahrzeugen. Bei Liniennetzen, bei denen eine im Vergleich zur Fahrleistung hohe Anzahl Streckenladestationen errichtet werden müsste und keine zentrale Streckenladestationen geteilt werden können, kann es langfristig wirtschaftlicher sein, auf Wasserstoff-Brennstoffzellenbusse zu setzen.

#### *Zusatzheizungen sind notwendig*

Zusatzheizungen mit (Bio-)Diesel oder Bioethanol können eine technische Lösung für kurze, extreme Kältezeiten während des Winters sein und die geforderte Batteriekapazität der Busse erheblich entlasten. Dadurch können weitaus mehr Tageseinsätze elektrifiziert werden, die sonst im Winter zu hohe Stromverbräuche aufweisen würden.

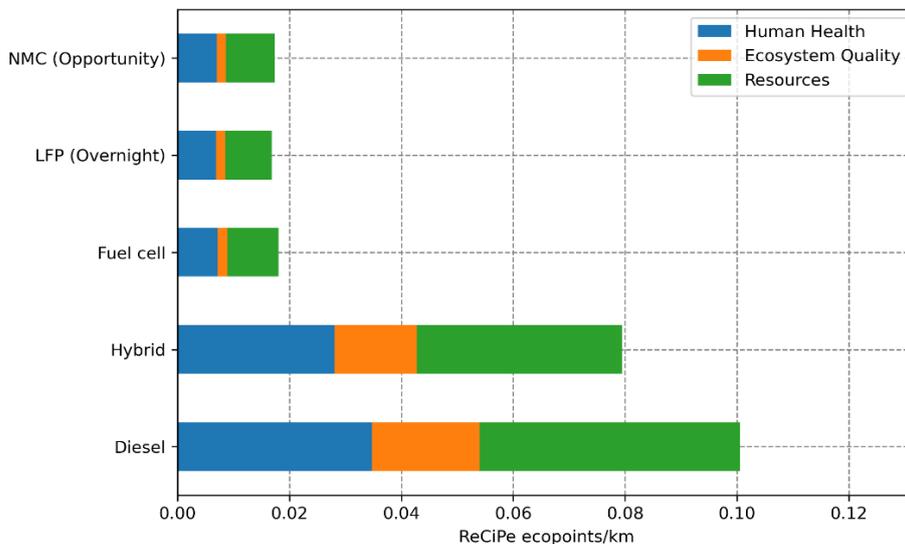
*Herausfordernde Dimensionierung der Busflotte und Ladeinfrastruktur*

Obwohl die technische Machbarkeit einer 100 %-Elektrifizierung der Busflotte in Bergregionen gegeben ist, schlagen sich ein allfälliger Mehrbedarf an Fahrzeugen sowie die notwendige Ladeinfrastruktur in den Busdepots und entlang der Busstrecken in den Kosten nieder.

**Ökologische Erkenntnisse für ländlich-touristische Bergregionen**

Die Lebenszyklusanalyse (LCA) für ländlich-touristische Bergregionen wurde gemeinsam von EBP und dem Paul Scherrer Institut (PSI) entwickelt. Die allgemein übertragbaren Ergebnisse der LCA sind in den folgenden Abbildungen zu sehen. Es sind die Ergebnisse für die Antriebsarten Diesel, Dieselhybrid, Wasserstoff-Brennstoffzelle, Depotlader und Streckenlader zu sehen.

Bei den gesamten Umweltauswirkungen schneiden Dieselbusse mit knapp 0.1 ReCiPe-Umweltpunkten pro km am schlechtesten ab, während Hybridbusse etwa 20% besser abschneiden. Die drei Antriebsarten Wasserstoff-Brennstoffzelle, Depotlader und Streckenlader ermöglichen eine Reduktion von etwas mehr als 80 % der Umweltauswirkungen gegenüber Dieselbussen.

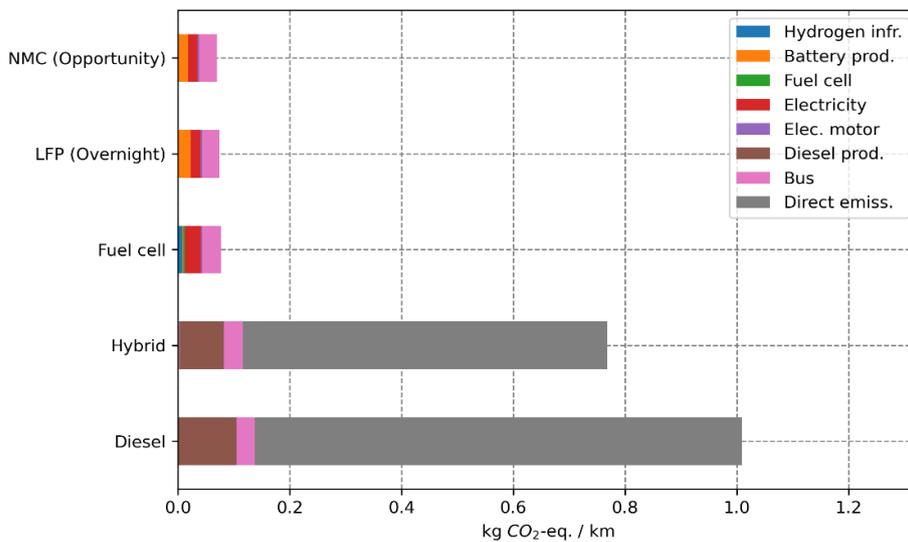


Gesamte Umweltauswirkungen über den Lebenszyklus in ReCiPe-Umweltpunkten je Antriebsart (Annahmen: 12m Standardbus, Winterbetrieb, erneuerbarer Strommix); Erklärung: NMC = Fahrzeugbatterie mit Kathode aus Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid, typisch für Streckenlader-Busse, LFP: Fahrzeugbatterie mit Kathode aus Lithiumeisenphosphat, typisch für Depotlader-Busse

Mit Blick auf die Treibhausgasemissionen<sup>1</sup> sind erhebliche Verbesserungen bei alternativen Antrieben gegenüber Dieselbussen zu beobachten. Mit Hybridbussen lassen sich etwa 25 % der Emissionen vermeiden, während

1 Ausgedrückt als sog. CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>-eq).

Batterie- und Wasserstoffbusse bis zu 90 % der Treibhausgase einsparen können.



Lebenszyklus-Emissionen von Treibhausgasen je Antriebsart  
(Annahmen: 12m Standardbus, Winterbetrieb, Maximal erneuerbarer Strommix)

Insgesamt ist ein Umstieg auf alternative Busantriebe aus ökologischer Sicht sehr vorteilhaft und kann erheblich Treibhausgasemissionen reduzieren. Bei einem Flottenumstieg sollte zusätzlich auf einen erneuerbaren Strommix gesetzt werden, um das gesamte ökologische Potenzial nutzen zu können. Zugleich kann zur Erleichterung einer Flottenelektrifizierung auf Zusatzheizungen mit (Bio-)Diesel oder Bioethanol gesetzt werden. Wie die LCA aufzeigen konnte, können trotz der Verbrennung signifikante Reduktionen von 70% der Treibhausgasemissionen gegenüber Dieselsebussen erzielt werden.

### Wirtschaftliche Erkenntnisse für ländlich-touristische Bergregionen

Die gesamte Investitionsrechnung zeigt auf, dass die Elektrifizierung der Busflotte zu erheblichen Mehrkosten gegenüber dem heutigen Einsatz mit Dieselsebussen führt. Hauptgründe dafür sind die etwa doppelten Anschaffungskosten der Batteriebusse gegenüber Dieselsebussen sowie sehr hohe Kosten für Ladeinfrastruktur.

Die herausfordernde Einsatzumgebung der ländlich-touristischen Bergregionen ist dabei der Treiber der sehr hohen Kosten für Ladeinfrastruktur: Die Tageseinsätze von Bussen sind vom Energiebedarf anspruchsvoller als in der Stadt und die Fahrzeugausnutzung über den Tag vollends maximiert. Als Folge daraus benötigen zahlreiche Tageseinsätze neben Depotladestationen auch Streckenlader. Streckenlader weisen hohe Investitionskosten pro Pantographen auf und verursachen durch ihre hohen Anschlussleistungen signifikante Leistungsentgelte. Insbesondere bei kleinen Busflotten fallen die Infrastrukturkosten für Streckenlader stark ins Gewicht, da die Streckenlader in diesem Fall nur von wenigen Bussen und selten genutzt werden.

#### *Anzahl Streckenlader optimieren*

Die Anzahl an Streckenladern ist geringzuhalten und eine hohe Auslastung pro Pantographen anzustreben. Dadurch können die Kosten gleichmässiger

auf die gesamte Fahrzeugflotte verteilt werden. Wir empfehlen aus Kostengründen gemäss der Fallstudie ein Verhältnis von 1:4 zwischen Streckenladern und Fahrzeugen nicht zu überschreiten. Die Anzahl an Streckenladern kann geringgehalten werden, indem primär auf Depotlader-Bussen mit grösseren Batterien gesetzt wird und die notwendigen Pantographen an zentralen Knotenpunkten des jeweiligen Liniennetzes (z.B. Bahnhöfen) aufgestellt werden.

#### *Leistungsspitzen reduzieren*

Die Leistungsspitzen der Pantographen können reduziert werden, indem insgesamt weniger Ladeleistung vorgesehen wird oder ein zusätzlicher Batteriespeicher beim Pantographen zur Glättung der Leistungsspitzen eingesetzt wird. In dem Fall wird die Batterie mit geringer Leistung gleichmässig geladen und speist den Pantographen dann mit voller Leistung während eines Ladevorgangs.

### **Handlungsempfehlungen**

Für eine Elektrifizierung von Busflotten in ländlich-touristischen Bergregionen empfehlen wir folgende Schritte:

#### *Zusatzheizungen in Fahrzeugen einsetzen*

Zusatzheizungen ermöglichen und erleichtern die Elektrifizierung von Busumläufen, während aus der Gesamtsicht der Busse weiterhin hohe Treibhausgaseinsparungen realisiert werden können. Zusätzlich reduzieren Sie den Bedarf an Streckenladern.

#### *Anzahl an Streckenladern durch systemische Anpassungen reduzieren*

Streckenlader sind für die Elektrifizierung in ländlich-touristischen Bergregionen notwendig. Allerdings erschweren ihre hohen Kosten die Finanzierung einer Flottenumstellung. Daher sollte ihre Kosten soweit, wie möglich reduziert werden, indem wenige, zentrale Ladeplätze mit hoher Frequentierung durch mehrere Buslinien bestimmt werden und andererseits systemische Anpassungen, wie längeren Wartezeiten an Endhaltestellen, Zwischenstopps im Depot, Änderungen der Umlaufzusammensetzung oder Aufteilungen der Umläufe vorgesehen werden. Die Leistungsentgelte infolge von Leistungsspitzen können durch den Einsatz dezentraler Batterien beim Pantographen reduziert werden.

#### *Schrittweise Flottenelektrifizierung bei zumutbaren Mehrkosten*

Wenn die Finanzierung der Mehrkosten einer Vollelektrifizierung nicht zumutbar ist, sollte eine Elektrifizierung in Etappen in Erwägung gezogen werden. Selbst bei einer herausfordernden Einsatzumgebung wie ländlich-touristische Bergregionen lassen sich ein Drittel der Busflotte mit Depotlader-Bussen, ohne Streckenlader und ohne erhebliche Mehrkosten für die Ladeinfrastruktur elektrifizieren. Die restliche Flotte kann zwischenzeitlich durch (Plug-in-)Hybridbusse ersetzt werden, während die technische und preisliche Entwicklung von Wasserstoffbussen und Batteriebussen in den kommenden 10 bis 15 Jahren beobachtet werden sollte. Selbst ein erster Teilersatz der Dieselbusflotte mit Depotlader-Bussen führt zu deutlichen Treibhausgaseinsparungen.

## English summary

Rural-touristic mountain regions directly face the consequences of climate change (e.g. on their future tourism offers due to shorter skiing seasons), so that the active engagement to protect the climate is increasing. The question arises what role public transport can play in the reduction of greenhouse gas emissions, since mainly diesel buses are used to provide local and inter-urban transport, today.

A shift from diesel buses to alternative drive systems (battery, diesel-hybrid or hydrogen fuel cell) is a central lever for active climate protection. However, bus operators in rural-touristic mountain regions have to face specific challenges compared to urban regions:

- Strong seasonal fluctuations in demand for public transport
- Large climatic fluctuations over the year (about  $-25^{\circ}\text{C}$  to  $+30^{\circ}\text{C}$ ) and the associated air conditioning/heating requirements
- Snowfall and intensive road conditions in winter
- Bus lines with large inclines and steep slopes
- High mileage and long daily operation of the buses

The following study shows for the specific use of buses in rural-touristic mountain regions, how a shift to alternative drive systems is possible and can be successful from a technical, ecological and economic perspective, taking into account these challenges.

Despite the differences in the use of buses in the different mountain regions of Switzerland, the study provides general insights for rural-touristic mountain regions.

### **Technical takeaways for rural-touristic mountain regions**

#### *100% electrification is technically possible*

Despite the extreme demands of driving operations and air conditioning/heating, full electrification of the bus fleet in mountain regions is technically possible. The prerequisite for this is the use of opportunity chargers and the installation of auxiliary heating systems in the vehicles. In line networks where many opportunity chargers would have to be installed in comparison to the number of kilometers driven, it may be more economical in the long run to rely on hydrogen fuel cell buses.

#### *Auxiliary heating systems are necessary*

Auxiliary heating systems using (bio)diesel or bioethanol can be a technical solution for short, extreme cold periods during winter and can considerably reduce the necessary battery capacity of buses. As a result, more daily bus tours can be electrified, which would otherwise have too high power consumption in winter.

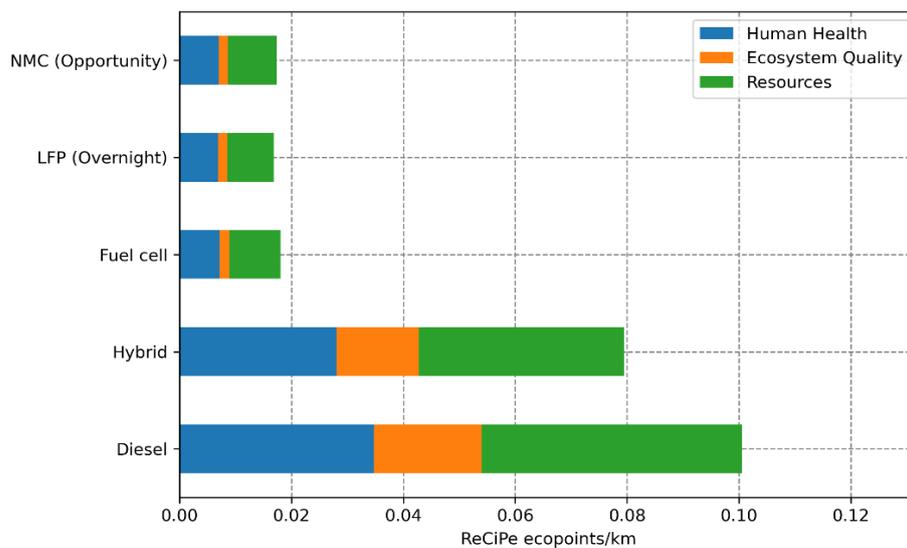
*Challenging dimensioning of the bus fleet and charging infrastructure*

Although the of 100% electrification of the bus fleet is technically feasible in mountain regions, potentially increasing amounts of necessary buses and the necessary charging infrastructure – in bus depots and along the bus routes – increase the overall costs.

**Ecological takeaways for rural-touristic mountain regions**

The Life Cycle Analysis (LCA) for rural-touristic mountain regions was jointly developed by EBP and the Paul Scherrer Institute (PSI). The generally transferable results of the LCA can be seen in the following figures. The results are shown for the drive systems diesel, diesel-hybrid, hydrogen fuel cell and depot-charged and opportunity-charged battery.

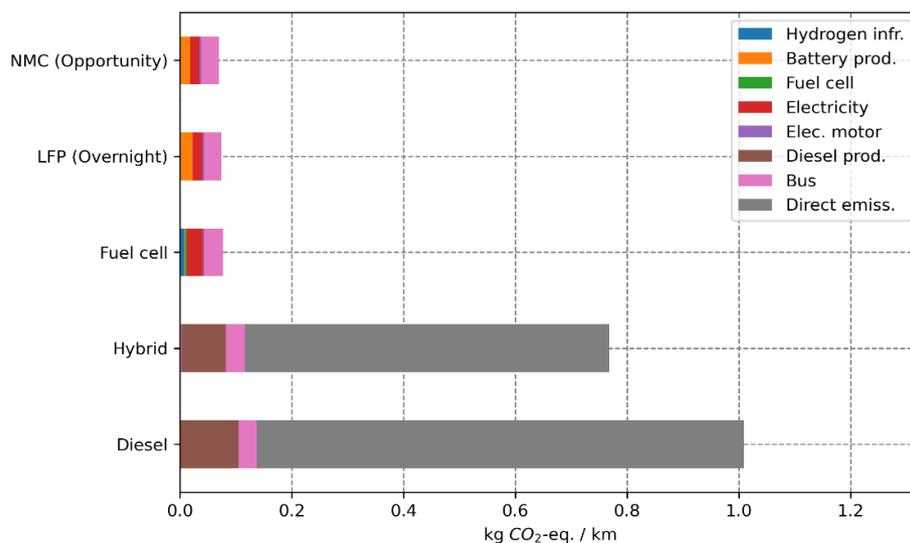
In terms of total environmental impact, diesel buses perform worst with just under 0.1 ReCiPe-ecopoints per km, while hybrid buses perform about 20% better. The three systems of drive – hydrogen fuel cell, depot-charged and opportunity-charged battery – allow a reduction of about 80% in total environmental impact compared to diesel buses.



Total environmental impact over the life cycle in ReCiPe-ecopoints, per drive system (Assumption: 12m standard bus, operation in winter, renewable energy mix);  
 Explanation: NMC = Vehicle battery with cathode made of lithium nickel manganese cobalt oxide, common for opportunity-charged battery busses, LFP: Vehicle battery with cathode made of lithium iron phosphate, common for depot-charged battery busses

Regarding greenhouse gas emissions<sup>2</sup>, considerable improvements can be observed with alternative drive systems compared to diesel buses. With hybrid buses, about 25% of emissions can be avoided, while battery and hydrogen buses can save up to 90% of greenhouse gases.

2 As so-called CO2 equivalents (CO2-eq).



Life cycle emissions of greenhouse gasses per drive system  
(Assumption: 12m standard bus, operation in winter, renewable energy mix);

Overall, a shift to alternative bus drive systems is very beneficial from an ecological point of view and can reduce greenhouse gas emissions considerably. When shifting to a new fleet, a renewable energy mix should be used in order to realize the full ecological potential. At the same time, auxiliary heaters with (bio-)diesel or bioethanol can be used to facilitate electrification of the bus fleet, since reductions of at least 70% of greenhouse gas emissions can still be achieved compared to diesel buses, despite combustion.

### **Economic takeaways for rural-touristic mountain regions**

The investment calculation shows that the electrification of a bus fleet leads to considerable additional costs compared to current diesel buses. The main reasons for this are the high purchase costs of battery buses – twice as high as for diesel buses – and very high costs for charging infrastructure.

The challenging operational environment of the rural-touristic mountain regions causes the very high costs for charging infrastructure: The daily operations of buses are more demanding in terms of energy requirements than in the city and the vehicle utilization during the day is completely maximized. As a result, many daily operations require not only depot charging stations but also opportunity chargers. Opportunity chargers have high investment costs per unit and cause significant load charges due to their high-power connection. Especially for small bus fleets, the infrastructure costs for opportunity chargers can be a heavy burden, as in this case the opportunity chargers are rarely used – and only by a few buses – during daily operation.

#### *Optimize number of opportunity chargers*

The number of opportunity chargers should be kept low and a high utilization per opportunity charger should be aimed for. This allows the costs to be distributed more evenly over the entire vehicle fleet. For cost reasons, we recommend not to exceed a ratio of 1:4 for opportunity charger and vehicles, according to the case study. The number of opportunity chargers can be kept low by primarily using depot-charged buses with larger batteries and by installing the necessary opportunity chargers at central (e.g. train stations).

### *Reduce power peaks*

The power peaks of the opportunity chargers can be reduced by using less charging power overall or by using additional batteries to shave the power peaks. In this case, the battery is evenly charged with lower power and feeds the opportunity power with full power during a charging process.

### **Recommendations for action**

We recommend the following steps for the electrification of bus fleets in rural-touristic mountain regions:

#### *Use auxiliary heating systems in buses*

Auxiliary heating systems enable and facilitate the electrification of bus fleets, while high greenhouse gas savings can still be realized. At the same time, they also reduce the need for opportunity chargers.

#### *Reduce the number of opportunity chargers by systemic adjustments*

Opportunity chargers are necessary for electrification in rural-touristic mountain regions. However, their high costs make it difficult to finance a fleet conversion. Therefore, their costs should be reduced as far as possible by defining a few central, highly used charging points and by adjusting the bus system such as implementing longer waiting times at terminal stops, stopovers at depots or changes in the trip compositions. The load charges resulting from power peaks can be reduced by using decentralized batteries at the opportunity chargers.

#### *Stepwise fleet electrification at reasonable additional costs*

If financing the additional costs of a full electrification of buses is not possible, a stepwise fleet electrification should be considered. Even in a challenging operational environment such as rural-touristic mountain regions, one third of a bus fleet can be electrified with depot-charged buses, without opportunity chargers and at reasonable additional costs for the depot charging infrastructure. In the meantime, the remaining fleet can be replaced by (plug-in) hybrid buses, while the technical and price development of hydrogen buses and battery buses should be monitored over the next 10 to 15 years. Even a first partial replacement of a diesel bus fleet with depot-charged buses will lead to significant greenhouse gas savings.

## Résumé français

Le changement climatique a une influence directe sur les régions rurales de montagne à vocation touristique (p. ex. sur leurs futures offres touristiques, du fait de saisons de ski raccourcies), et fait naître ainsi une volonté d'action accrue des acteurs politiques d'agir en faveur d'une protection du climat. La question se pose de savoir quel rôle les transports publics (TP) peuvent jouer dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre, les bus au diesel étant à l'heure actuelle utilisés au premier chef pour les trajets locaux et interurbains.

Le remplacement des bus au diesel par des systèmes de propulsion alternatifs (batterie, hybride ou pile à combustible à hydrogène) est un moyen d'action crucial pour garantir une protection active du climat. Les compagnies de bus des régions rurales de montagne à vocation touristique sont face à des problématiques spécifiques différentes de celles qui prévalent dans les régions urbaines :

- Forte variabilité saisonnière de la demande dans les TP
- Importantes fluctuations climatiques sur l'année (environ -25 °C à +30 °C) et besoins de climatisation/chauffage en conséquence
- Chutes de neige et salage intensif des routes en hiver
- Lignes de bus avec fortes déclivités
- Kilométrage élevé et longue durée de service quotidienne des bus

Avec ces problématiques spécifiques en toile de fond, le guide suivant montre comment les régions rurales de montagne à vocation touristique peuvent adopter des systèmes de propulsion alternatifs pour leurs services de bus, tout en démontrant leur intérêt sur le plan technique, écologique et économique.

Malgré la diversité des situations d'utilisation des bus de ligne entre les différentes régions de montagne suisse, le présent projet a permis de tirer des enseignements d'ordre général pour les régions rurales de montagne à vocation touristique – ce, d'un point de vue technique, écologique et économique.

### **Enseignements d'ordre technique concernant les régions rurales de montagne à vocation touristique**

#### *L'électrification totale est techniquement réalisable*

Malgré les exigences extrêmes liées à la conduite et au système de climatisation/chauffage des bus, l'électrification complète d'une flotte de véhicules en région montagneuse est techniquement réalisable. L'une des conditions préalables pour cela est l'utilisation de stations de recharge sur le parcours et l'installation de chauffages d'appoint à bord des véhicules. Dans le cas des réseaux de lignes où il faudrait installer un nombre important de stations de recharge le long des parcours par rapport au kilométrages effectués, et où le partage de telles stations de recharge centralisées est impossible, le choix de bus à pile à combustible à hydrogène peut s'avérer plus économique à long terme.

### *Des systèmes de chauffage d'appoint sont nécessaires*

Les chauffages d'appoint au (bio)diesel ou au bioéthanol peuvent s'avérer une solution technique pour les brèves périodes de froid extrême en hiver et épargner dans une large mesure les capacités de batterie requises pour faire rouler les bus. Cette option permet d'électrifier un nombre beaucoup plus important de services de bus quotidiens, lesquels exigeraient sinon une consommation électrique trop élevés pendant la saison froide.

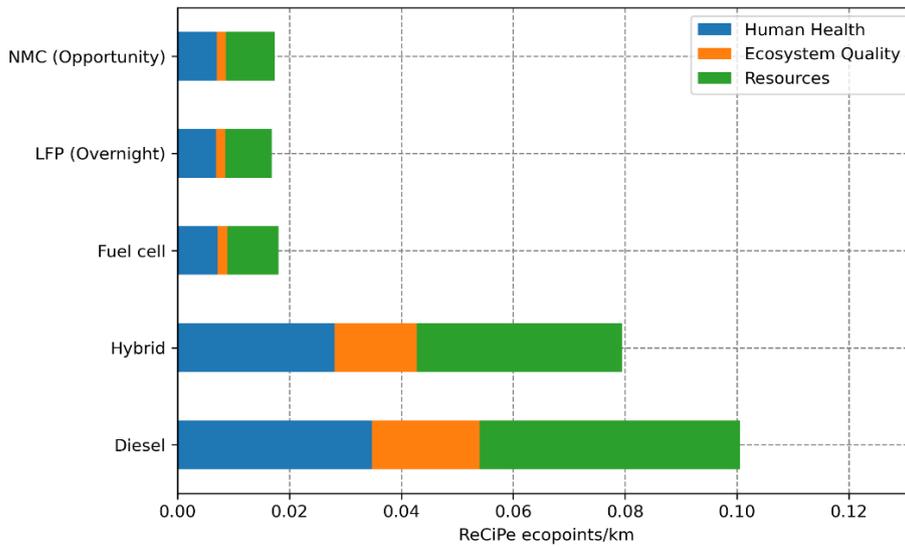
### *Le difficile dimensionnement des flottes de bus et de l'infrastructure de recharge*

Bien les conditions techniques d'une électrification totale de la flotte de bus soient réunies dans les régions montagneuses, tout éventuel besoin supplémentaire en véhicules et infrastructures de recharge dans les dépôts de bus et sur les parcours engendre un impact sur les coûts.

### **Enseignements d'ordre écologique concernant les régions rurales de montagne à vocation touristique**

Dans les régions rurales de montagne à vocation touristique, l'analyse du cycle de vie (ACV) a été mise au point conjointement par EBP et l'Institut Paul Scherrer (PSI). Les résultats, globalement transposables, de l'ACV sont présentés dans les illustrations suivantes. Ces dernières reprennent les résultats obtenus pour les modes de propulsion suivants : diesel, diesel hybride, pile à combustible à hydrogène, batterie avec recharge au dépôt et batterie avec recharge sur le parcours.

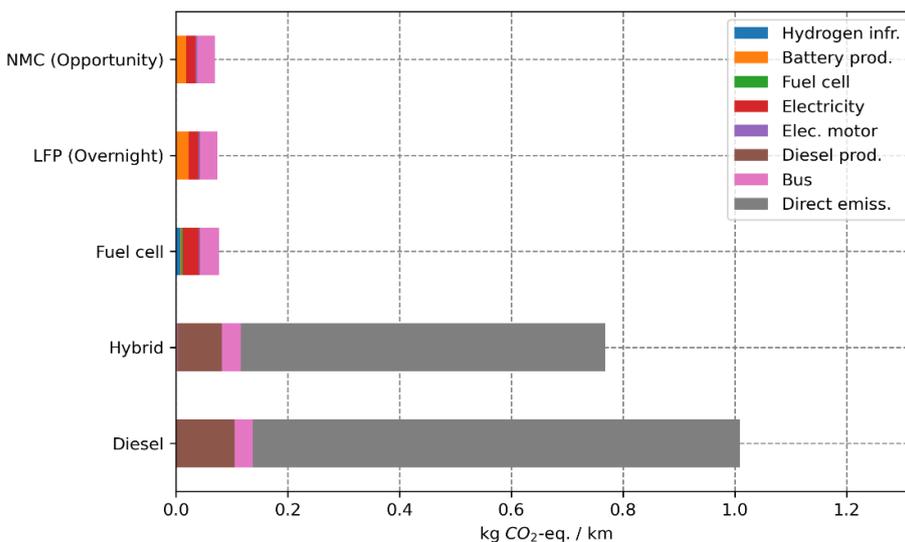
En termes d'impact environnemental global, les bus au diesel font figure de bons derniers, avec un score écologique légèrement en dessous de 0,1 point ReCiPe par km, tandis que les bus hybrides sont environ 20 % plus performants. Les trois modes de propulsion – pile à combustion à hydrogène, batterie avec recharge au dépôt et batterie avec recharge sur le parcours – permettent de réduire d'un peu plus de 80 % l'impact environnemental par rapport aux bus diesel.



Impact environnemental global sur le cycle de vie, en points ReCiPe (score environnemental) par mode de propulsion

(Hypothèses : bus standard de 12 m, service d'hiver, mix énergétique renouvelable) ;  
 Explication : NMC = batterie de véhicule avec cathode en lithium-nickel-manganèse-cobalt-oxyde, typique pour les bus électriques avec recharge sur le parcours, LFP : batterie de véhicule avec cathode en phosphate de fer et de lithium, typiquement utilisée dans les bus électriques avec recharge au dépôt

En matière d'émissions de gaz à effet de serre<sup>3</sup>, des améliorations considérables sont observées avec les modes de propulsion alternatifs par rapport aux bus roulant au diesel. Ainsi, les bus hybrides permettent de réduire les émissions de près de 25 %, tandis que les bus électriques et à hydrogène permettent une réduction des gaz à effet de serre pouvant atteindre 90 %.



Émissions de gaz à effet de serre pendant le cycle de vie, par mode de conduite (Hypothèses : bus standard de 12 m, service d'hiver, mix énergétique renouvelable maximal)

3 Exprimé en équivalents CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>-eq).

Dans l'ensemble, le passage à des systèmes de propulsion alternatifs pour les bus est très avantageux d'un point de vue écologique et permet une réduction substantielle des émissions de gaz à effet de serre. Lors du passage à une flotte de véhicules d'un nouveau type, le choix d'un mix énergétique renouvelable s'avère judicieux pour exploiter tout le potentiel écologique. Dans le même temps, le recours à des chauffages d'appoint au (bio)diesel ou au bioéthanol peut s'avérer opportun pour faciliter l'électrification de la flotte de véhicules. L'ACV a permis de démontrer que, malgré la combustion, les émissions de gaz à effet de serre pouvaient être considérablement réduites (70 %) par rapport aux bus roulant au diesel.

### **Enseignements d'ordre économique concernant les régions rurales de montagne à vocation touristique**

Le calcul global des investissements montre que l'électrification de la flotte de bus engendre des surcoûts considérables par rapport aux bus diesel actuellement en service. Les principales causes résident dans les coûts d'acquisition des bus électriques, environ deux fois supérieurs à ceux des bus au diesel, ainsi que dans les coûts très élevés de l'infrastructure de recharge.

Les coûts très élevés des infrastructures de recharge s'expliquent par les conditions de service particulièrement difficiles rencontrées dans les régions rurales de montagne à vocation touristique expliquent : les services quotidiens assurés par les bus sont plus exigeants en termes de besoins énergétiques que dans les villes et l'utilisation des véhicules sur toute une journée est optimisée au maximum. Par conséquent, un grand nombre de services quotidiens nécessitent non seulement des stations de recharge au dépôt mais aussi des stations de recharge sur le parcours. Les stations de recharge sur le parcours représentent des coûts d'investissement par pantographe très élevés, auxquels s'ajoutent des commissions de service significatives dues à des puissances de raccordement élevées. Les coûts d'infrastructure des stations de recharge sur le parcours sont d'autant plus élevés dans le cas des petites flottes de bus, car les stations de recharge sur le parcours ne sont utilisées que sporadiquement et uniquement par un petit nombre de bus.

#### *Optimiser le nombre de stations de recharge sur le parcours*

Le nombre de stations de recharge sur le parcours doit être maintenu au minimum et il convient de maximiser et d'optimiser l'utilisation de chaque pantographe. Cela permet de répartir les coûts de manière plus sur l'ensemble de la flotte. Pour des raisons de coûts, nous recommandons, conformément à l'étude de cas, de ne pas aller au-delà d'un rapport de 1:4 entre le nombre de stations de recharge sur le parcours et le nombre de véhicules. Le nombre de stations de recharge sur le parcours peut être maintenu à un faible niveau en utilisant principalement des bus électriques avec recharge au dépôt dotés de grosses batteries et en installant les pantographes au niveau des nœuds de chaque réseau de lignes (p. ex. dans les gares ferroviaires).

*Réduire les pics de consommation*

Les pics de consommation des pantographes peuvent être réduits en diminuant la puissance de charge globale ou en utilisant une batterie de stockage supplémentaire au niveau du pantographe qui permet de lisser les pics de consommation. Dans ce cas, la batterie de moindre puissance se recharge de manière uniforme puis alimente le pantographe à pleine puissance lors du cycle de charge suivant.

**Recommandations d'action**

Aux d'électrification des flottes de bus dans les régions rurales de montagne à vocation touristique, nous recommandons les mesures suivantes :

*Équiper les véhicules de chauffages d'appoint*

Les chauffages d'appoint facilitent l'électrification des lignes de bus et, d'un point de vue général, il est encore possible réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre. L'ajout de chauffages d'appoint permet par ailleurs de réduire le nombre de stations de recharge sur le parcours requises.

*Réduire le nombre de stations de recharge sur le parcours par des ajustements systémiques*

Les infrastructures de recharge sur le parcours sont nécessaires à l'électrification des régions rurales de montagne à vocation touristique. Toutefois, leurs coûts élevés rendent difficile le financement d'une reconversion des flottes. C'est pourquoi il convient de réduire autant que possibles leurs coûts en installant un petit nombre de points de recharge à forte fréquentation desservant plusieurs lignes de bus tout en en prévoyant par ailleurs des ajustements systémiques tels que des temps d'attente plus longs aux terminaux, des arrêts temporaires dans les dépôts, des changements dans l'organisation des tournées ou de nouvelles répartitions des tournées. Le recours à des batteries décentralisées au niveau du pantographe permet de réduire les commissions de service dues au titre des puissances de pointe.

*Électrification progressive des flottes à des surcoûts raisonnables*

Si le financement des surcoûts d'une électrification totale n'est pas raisonnablement supportable, il convient d'étudier l'opportunité d'une électrification par étapes. Même dans les conditions de service particulièrement difficiles comme celles rencontrées dans les régions rurales de montagne à vocation touristique, il est possible de convertir un tiers de la flotte de bus en bus électriques avec recharge au dépôt, sans infrastructure de recharge sur le parcours et sans surcoûts majeurs liés à l'infrastructure de recharge. D'ici là, la flotte restante peut être remplacée par des bus hybrides (rechargeables) ; le développement des bus à hydrogène et des bus électriques sur le plan technique et en termes de coûts, quant à lui, devra faire l'objet d'un suivi attentif au cours des 10 à 15 prochaines années. Même un premier remplacement partiel de la flotte de bus au diesel par des bus électriques avec recharge au dépôt permettra de réaliser d'importantes économies de gaz à effet de serre.

## 1. Ausgangslage und Herausforderungen der ländlich-touristischen Bergregionen

Die Schweiz ist für ihren einzigartigen alpinen Raum bekannt, der sowohl im Winter zur Skisaison als auch im Sommer inländische und internationale Touristen anzieht. Um Touristenströme in die ländlichen, touristisch geprägten Bergregionen zu transportieren und um den Mobilitätsbedarf von Touristen und Anwohnern zu decken, hat sich über mehrere Jahrzehnte ein öffentliches Verkehrssystem herausgebildet, das in seiner Servicequalität weltweit einzigartig ist.

In den ländlich-touristischen Bergregionen ist der Einfluss des Klimawandels direkt spürbar (z.B. auf ihr zukünftiges Tourismusangebot aufgrund kürzerer Skisaisons), und erhöht die Sensibilisierung für aktiven Klimaschutz vor Ort. Dadurch stellt sich die Frage, welche Rolle der öffentliche Verkehr (ÖV) bei der Reduktion von Treibhausgasemissionen spielen kann, da heutzutage mehrheitlich Dieselsebusse zur Erbringung von Orts- und Regionalverkehr eingesetzt werden.

Die Energiestrategie öffentlicher Verkehr (ESöV) 2050 des Bundesamts für Verkehr (BAV) strebt die Erhöhung der Energieeffizienz und die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen an. Die Umstellung von Dieselsebussen auf alternative Antriebssysteme (batterieelektrisch, Hybrid, oder Wasserstoff-Brennstoffzelle) ist ein zentraler Hebel. Busbetriebe in ländlich-touristischen Bergregionen müssen sich dabei aber im Vergleich zu städtischen Regionen sehr spezifischen Herausforderungen stellen:

- Starke saisonale Nachfrageschwankungen im ÖV
- Grosse klimatische Schwankungen über das Jahr (etwa  $-25^{\circ}\text{C}$  bis  $+30^{\circ}\text{C}$ ) und damit verbundene Klimatisierungs-/Heizbedarfe
- Schneefall und intensive Strassensalzung im Winter
- Buslinien mit grossen Steigungen
- Grosse Fahrleistungen und lange Tageseinsätze der Busse

Der folgende Leitfaden zeigt für den spezifischen Buseinsatz in ländlich-touristischen Bergregionen auf, wie unter Berücksichtigung dieser Herausforderungen eine Umstellung auf alternative Antriebssysteme aus technischer, ökologischer und wirtschaftlicher Perspektive möglich ist und gelingen kann.

Dieser Leitfaden dient sowohl politischen Entscheidungsträgern als auch kommunalen Transportunternehmen (KTU) bei der Planung elektrischer Busflotten. Zusätzlich kann dieser Leitfaden Energieversorgern und Netzbetreibern einen Einblick in die Umstellung auf elektrische Busantriebe geben, da diese beim Bau von Ladeinfrastruktur und der Stromlieferung intensiv miteinzubeziehen sind.

Der folgende Bericht basiert auf Erkenntnissen aus einer Fallstudie für die Bergregion Oberengadin und wurde in Zusammenarbeit von Engadin Bus, St. Moritz Energie, EBP und dem Paul Scherrer Institut erstellt. Für exemplarische Vorgehen für ländlich-touristische Bergregionen wird aufgrund der Erfahrungen aus der Fallstudie aufgezeigt und die allgemein gültigen

Aussagen hervorgehoben. Die «Fallstudie Oberengadin» als Konkretisierung des hier aufgezeigten Vorgehens ist in einem eigenen Bericht ebenfalls als Publikation des Projekts P-196 auf der Webseite des Bundesamts für Verkehr (BAV) zu finden.

Zusätzlich ist an dieser Stelle noch auf zwei vorherige Projekte zu verweisen, die im Rahmen der ESöV 2050 durch das Bundesamt für Verkehr gefördert wurden und sich allgemein mit der Umstellung auf alternative/ elektrische Busantriebe befasst haben:

- «Etude du potentiel des systèmes de propulsion alternatifs pour bus» (P-113)
- «Leitfaden Flottenelektrifizierung für Busbetriebe» (P-144)

## 2. Methodisches Vorgehen

Das exemplarische Vorgehen zur Umstellung von Busflotten auf alternative Antrieben lässt sich in folgende Schritte gliedern. Die quantitativen Analyseschritte werden in den nachfolgenden Kapiteln vertieft, während dabei auf die speziellen Herausforderungen für ländlich-touristische Bergregionen eingegangen wird.

1. Festlegung des **Zieljahrs** für die 100 %-Umstellung auf erneuerbare betriebene Linienbusse
2. Identifikation der **technologischen Optionen**, unter Berücksichtigung der bereits vorhandenen Antriebstechnologien (Kapitel 3)
3. Analyse der Linien, der Busflotte und des Einsatzes der Busse auf den Linien (**Flottenmodellierung**) zur Klärung der benötigten Antriebsarten für eine Vollelektrifizierung (Kapitel 4)
4. **Ökobilanzierung** der analysierten Antriebsarten aus einer umfassenden Lebenszyklus-Perspektive (Kapitel 5)
5. **Wirtschaftliche** Bewertung der möglichen Antriebsarten (Kapitel 6)
6. **Qualitative Bewertung** der Relevanz von Aspekten wie längerfristige **Flexibilität** (möglich Weiterentwicklung des ÖV-Angebots auf Ebene der Linien) oder kurzfristige Flexibilität (geplante Streckensperrungen oder periodische Routenänderungen; Unfälle und Ausfall von Infrastrukturen)
7. Ableitung von **Handlungsempfehlungen** für die verschiedenen Akteure (Busbetreiber, Besteller, Standortgemeinden, Energieversorger)

### 3. Technologieoptionen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über mögliche alternative Antriebstechnologien für ländlich-touristische Bergregionen und Heiz- und Klimatisierungsoptionen für Busse. Auf eine detaillierte Beschreibung der Ladetechnologien und Energiezuführung wurden an dieser Stelle verzichtet, da der «Leitfaden der Flottenelektrifizierung für Busbetriebe» (ESöV P-144) hier bereits einen Schwerpunkt setzt.

#### 3.1 Alternative Busantriebe

Für einen CO<sub>2</sub>-ärmeren Busbetrieb kommen allgemein sechs Antriebsarten in Frage: Hybrid, Batterie, Wasserstoff-Brennstoffzelle, Biogas, synthetische Treibstoffe und Trolley (Abbildung 1). In Frage kommen in ländlich-touristischen Bergregionen bislang allerdings nur Batterie- und Hybrid-Antriebe, da andere Antriebsarten entweder noch nicht marktreif oder skalierbar sind. Längerfristig ist allerdings ein Einsatz von Brennstoffzellenbussen denkbar. Trolleybusse kommen in ländlich-touristischen Bergregionen nicht in Frage, da es eine hohe Auslastung und Fahrplantaktung benötigt, um die hohen Kosten der ortsfesten Oberleitungen amortisieren zu können.

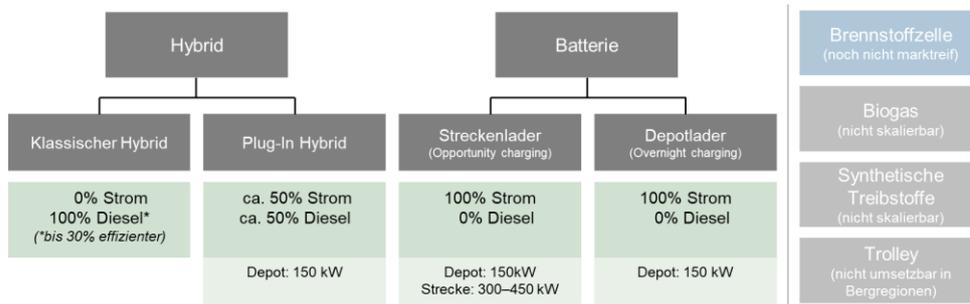


Abbildung 1. Überblick alternativer Antriebsarten und ihres Elektrifizierungsgrads.

#### Hybridbusse

Hybridbusse nutzen als Antrieb einen Dieselmotor und einen zusätzlichen Elektromotor. Sie sind bereits mehrere Jahre am Markt, bei verschiedenen Busherstellern erhältlich und kommen mit bis zu 20 % weniger Dieserverbrauch aus. Künftig sind Einsparungen bis zu 30 % denkbar. Die klassische Hybridtechnologie, bei der ein Elektromotor ausschliesslich rekuperierte Energie in einer kleinen Batterie speichert und nutzt, um die Fahrzeugeffizienz steigert, gilt als technologisch ausgereift. Diese Art von Hybridantrieb wird zunehmend durch Plug-In-Hybridbusse (z.B. Volvo 7900 Electric Hybrid) ersetzt, in denen Verbrennungs- und Elektromotoren ähnlicher Leistungsstärke und eine vergrößerte Batterie, die im Unterschied zum Hybridbus auch extern aufladbar ist, verbaut sind. Insgesamt wird bei Hybridbussen in den kommenden Jahren ein steigender Anteil der Antriebsleistung aus dem Elektromotor und der Batterie stammen, während der Verbrennungsmotor verkleinert und vom Antriebsmotor zum Generator (Range Extender) wird.

### **Brennstoffzellen-Busse**

Brennstoffzellenbusse sind ebenfalls elektrisch angetriebene Busse. Sie sind mit reinen batterieelektrischen Bussen weitgehend gleich, haben aber eine kleinere Batterie und dafür eine zusätzliche Brennstoffzellen-Einheit: Sie nutzen Wasserstoff, der zuvor per Elektrolyse (d.h. mit Strom) aus Wasser erzeugt wurde. Im Fahrzeug wird der Wasserstoff wieder oxidiert und damit in elektrischer Energie zurückgewandelt, wobei als Emission Wasser entsteht. Mit der elektrischen Energie wird die Batterie aufgeladen und der Elektromotor betrieben (denkbar sind künftig auch grössere extern aufladbare Batterien, also Plug-in-Brennstoffzellenbusse). Aktuell sind Brennstoffzellen-Busse erst bei wenigen Busherstellern erhältlich, die bislang nur Testserien in niedrigen Stückzahlen fertigen. Das aktuelle Bild zur technischen Reife der Brennstoffzellenbusse ist gemischt: So schaffte die Hamburger Hochbahn ihre Busse nach einem Pilotversuch im Februar 2019 aufgrund mangelnder technischer Reife bei Fahrzeugen und Tankinfrastruktur ab<sup>4</sup>, während Regionalverkehr Köln und die Wuppertal Stadtwerke im März 2020 in einen Pilotversuch mit Wasserstoff-Hybridbussen begannen. Als Basis der Brennstoffzellenbusse braucht es alle technischen Komponenten batterieelektrischer Busse, die in den nächsten Jahren technisch ausgereift bereitstehen werden. In den kommenden Jahren werden insbesondere Verbesserungen bei der Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Brennstoffzelle sowie der Wasserstoffspeicherung erwartet. Die Verfügbarkeit und der hohe Preis von erneuerbar produziertem Wasserstoff (sog. «grüner Wasserstoff») stellen eine grosse Hürde für die Nutzung von Brennstoffzellenbussen dar. Abschliessend ist hier die weitere Technologie- und Preisentwicklung der kommenden Jahre zu verfolgen, bevor Brennstoffzellenbusse als relevante Antriebsvariante in Frage kommen. Zukünftig könnten Brennstoffzellenbusse allerdings auf besonders langen und verbrauchsstarken Strecken eingesetzt werden, die für rein batterieelektrische Busse (noch) nicht zu bewältigen sind.

### **Batterieelektrische Busse**

Batterieelektrische Busse lassen sich in zwei Busvarianten unterteilen: Depotlader (engl. Overnight Charger) und Streckenlader (engl. Opportunity Charger). Beide Busvarianten nutzen Batterien als Energiespeicher und werden von einem Elektromotor angetrieben.

#### **Depotlader**

Depotlader sind von ihren Batterien so ausgelegt, dass die Speicherkapazität für einen ganzen Einsatz (entweder für einen ganzen Tag oder bis zur Rückkehr ins Busdepot für eine Nachladung und anschliessenden 2. Einsatz) ausreicht. Die Nachladung erfolgt nur zentral im Depot nach Abschluss des Tageseinsatzes oder während längerer Betriebspausen. Der Ladevorgang ist dadurch zeitlich länger (im Vergleich zum Streckenlader) und erfolgt meist kabelgebunden via CCS-Typ-2-Stecker mit einer maximalen Ladeleistung von 150 kW pro Stecker. Die erforderliche hohe Speicherkapazität der Batterien verursacht ein hohes Gewicht im Fahrzeug und kann die zulässige Kapazität für Sitz- und Stehplätze reduzieren. Die Kosten für die Batterien steigen proportional mit der benötigten Speicherkapazität. Das höhere

<sup>4</sup> <https://www.handelsblatt.com/23984282.html> (Zugriff: 27.08.2020)

Gewicht führt zu einem etwas höheren Traktionsenergiebedarf und etwas höheren Reifenabrieb.

### Streckenlader

Streckenlader verfügen über kleinere Batterien, deren Speicherkapazität nicht für einen ganzen Tageseinsatz ausreicht. Die Batterie muss während des Tageseinsatzes auf der Strecke nachgeladen werden. Da die Zeitfenster zum Nachladen während des Betriebs – sofern keine zusätzlichen Pausen eingeplant werden – meist eng ausfallen, erfolgt die Ladung mit hohen Leistungen über spezielle Docking-Stationen via Pantographen mit einer maximalen Ladeleistung von 450 kW bis zukünftig 600 kW. Als Standort zum Laden eignen sich häufig Endhaltestellen und Wendepunkte von Buslinien, während aus Sicht einer hohen Nutzung der Ladeinfrastruktur auch zentrale Bushaltestellen infrage kommen. Je nach Betriebsszenario sind möglicherweise Anpassungen an Umläufen vorzunehmen, um ausreichende Ladezeiten zu ermöglichen. Die geringere Speicherkapazität der Batterien wirkt sich positiv – verglichen mit dem Depotlader – auf das Fahrzeug aus, weil das Fahrzeuggewicht sinkt, der nötige Einbauraum geringer ausfällt und die Batterie kostengünstiger ist. Allerdings werden bei Streckenladern je nach Hersteller andere Batterie-Zellchemien eingesetzt, die eine höhere Leistungsaufnahme ermöglichen und teils andere Kosten als die Batterien des Depotladers aufweisen.

Mittlerweile bietet jeder grosse Hersteller von Linienbussen batterieelektrische Fahrzeuge an (Tabelle 1). Dabei lässt die stark angestiegene Nachfrage in der europäischen Union aufgrund der Clean Vehicle Directive aktuelle Lieferfristen auf 18 bis 24 Monate ansteigen (Stand Mitte 2020). Die Technologie der Busse wird zunehmend standardisiert und bestellbare Batteriekapazitäten steigen kontinuierlich, während die Kosten pro kWh Speicherkapazität sinken. Für die kommenden Jahre wird zudem erwartet, dass sich die Schnellladefähigkeit – angegeben mit der sog. Charging Rate (C-Rate) – verbessert und energiesparende Klimatisierungskonzepte mit Wärmepumpen oder Infrarothheizungen zunehmend in Fahrzeugen verbaut werden. Zusätzlich entwickeln sich Ladesysteme hardware- und softwareseitig so weiter, dass die Standardisierung und Interoperabilität zwischen Ladeinfrastruktur und Bussen verschiedener Hersteller zunehmen.

Busname	Mercedes eCitaro	Volvo 7900 Electric	VDL Citea SLF-120 Electric	Solaris Urbino 12 electric
<b>Beförderungskapazität (Personen)</b>	93, davon 29/1 Sitze	95, davon 34/1 Sitze	95	93, davon 37/1 Sitze
<b>Motorleistung</b>	Peak: 2x125kW Dauer: 2x60kW	Peak: 185kW Dauer: 145kW	160kW	2x 110kW
<b>Batterietyp</b>	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion
<b>Erhältliche Batteriekapazitäten</b>	150-330kWh	150-200kWh	216-288kWh (C-Rate 1.5) 85-127kWh (C-Rate 2.5)	200-300kWh
<b>Ladeleistung &amp; -dauer</b>	150kW	CCS-Ladestecker: 150kW Opp. Charging: 300kW	320/430kW (C-Rate 1.5) 210/310kW (C-Rate 2.5)	Keine Angabe
<b>Einführungsjahr</b>	2018	2017	2013	2017

Tabelle 1: Technische Spezifikationen aktueller Batteriebusmodelle (12m) grosse Hersteller

### **Standardisierung von Ladesystemen**

Beim Laden von batterieelektrischen Bussen wird im Depot meist auf einen Ladeanschluss mit CCS-Combo-Typ-2-Stecker gesetzt. Mit diesem Stecker lassen sich Busse mit hohen Leistungen von 150kW mit Gleichstrom (DC) laden. Sowohl die Ladestecker als auch die Signalbelegung der Steckerpins zur Ladekommunikation sind in der ISO-Norm IEC 62196 definiert. Durch die Normierung ist eine hohe Kompatibilität der Fahrzeuge und der Ladesysteme verschiedener Hersteller gegeben.

Anders sieht es hingegen beim Streckenladen mit Pantographen aus (engl. Opportunity Charging). Hier bieten Bushersteller und Ladeinfrastrukturhersteller verschiedene Lösungen an, z.B. mit Pantographen auf dem Fahrzeug (Bottom-Up) oder invertierten Pantographen, die von der Ladestation von oben auf Ladeschienen oder -kontakte auf dem Fahrzeug ausgeklappt werden (Top-Down). Zwar ist das Streckenladen ein bereits technisch reifes Ladekonzept, das in einigen Städten - vor allem in den Niederlanden - eingesetzt wird, doch gibt es bei Pantographen und Andockstellen noch keinen einheitlichen Standard. Das OppCharge-Konsortium (u.a. bestehend aus ABB, Siemens, Solaris und Volvo) lanciert aktuell (Stand 2020) einen Standard für Top-Down-Pantographen.

Insgesamt bestehen beim Streckenladen in Bezug auf die Normierung und die Standardisierung noch Lücken. Daher sollte bisweilen bei der Anschaffung von Batteriebusen und Pantographen genau auf die Kompatibilität geschaut werden, um die langfristige Nutzbarkeit des Gesamtsystems aus Bussen und Ladeinfrastruktur sicherzustellen.

### **Fahrzeuggbatterien**

Bei batterieelektrischen Bussen ist vor allem die Fahrzeugbatterie eine kritische Komponente, die näher verstanden werden muss, wenn über eine Umstellung der Busflotte nachgedacht wird. Während ihres Betriebs altern Batterien, d.h. sie verlieren an Speicherkapazität (kWh) und (Ent-)Ladeleistung (kW). Die Alterung einer Batterie hängt in der Regel von vier Betriebsparametern ab:

- a) Anzahl der (Ent-)Ladevorgänge
- b) Tiefe der (Ent-)Ladevorgänge
- c) Leistung des (Ent-)Ladevorgangs
- d) Kalendarisches Alter der Batterie
- e) Temperatur der Batterie im Betrieb

Mit Hilfe dieser Betriebsparameter können theoretische Vorhersagen über das Alterungsverhalten der Batterien getroffen werden. Allerdings besteht ein reger wissenschaftlicher Diskurs über passende Alterungsmodelle, während diese Modelle für jeden Batterietyp und -hersteller separat zu kalibrieren sind. Deshalb ist eine verallgemeinerte Nutzung von Alterungsmodellen

meist nicht hilfreich. Wichtig ist zu wissen, dass ein Anstieg jedes Betriebsparameters zu einer tendenziell höheren Alterung der Batterie führt.

Im Zusammenhang mit der Batteriealterung wird seitens der Bus- und Batteriehersteller meist eine Garantie ausgesprochen, wie viel Betriebsjahre oder Ladezyklen vergehen, bis das Lebensende (engl. end of life; EoL) der Batterie erreicht wird. Das technische EoL einer Batterie wird nach marktüblicher Definition bei 80% Restkapazität der ursprünglichen Batteriekapazität erreicht. Die meisten Bushersteller gehen davon aus, dass ihre Batterien ihr EoL nach einem Betrieb von 6 bis 8 Jahren erreichen. Bei einer gesamten Buslebensdauer von 12 bis 14 Jahren in der Schweiz ist daher von *einem* Batterieersatz pro Bus bei der Anschaffung auszugehen.

Die Energiedichte der marktdominierenden Lithium-Ionen-Batterien hat sich in den vergangenen Jahren erheblich verbessert. Diese Entwicklung konnte insbesondere im Bereich der Personenwagen beobachtet werden (Abbildung 2). Gleichzeitig wird erwartet, dass die Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien weiter ansteigt, zumal international explizite Forschungsziele für Energiedichten von Lithium-Ionen-Batterien ausgerufen wurden (Abbildung 2).

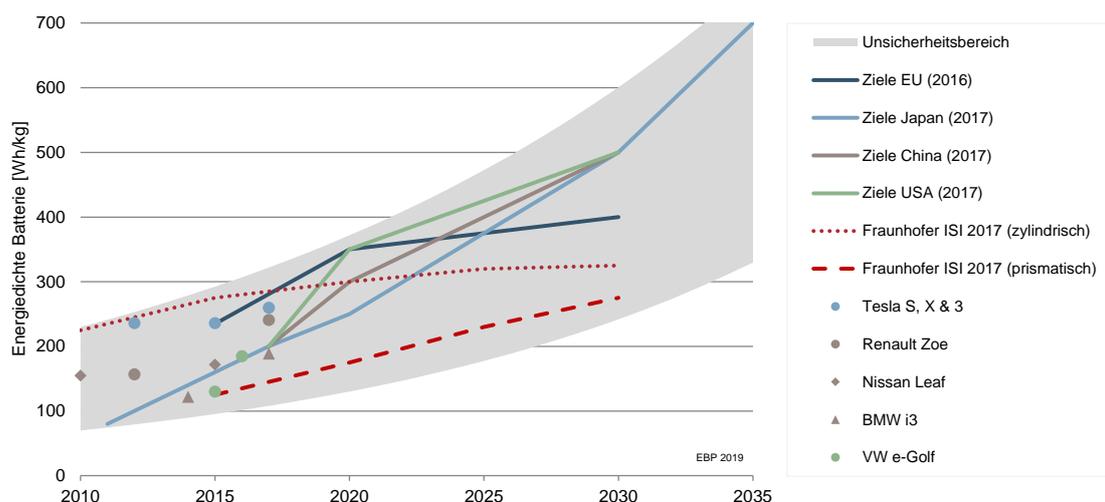


Abbildung 2: Vergangene und prognostizierte Entwicklung der Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien (Stand: Januar 2020)

Der Anstieg der Energiedichte der Lithium-Ionen-Batterien ist für batterieelektrische Busse besonders relevant, da dadurch grössere Batteriekapazitäten in den Fahrzeugen und damit grössere Reichweiten ermöglicht werden. Die vergangenen Jahre konnte bereits ein entsprechender Anstieg der Batteriekapazitäten bei batterieelektrischen Bussen beobachtet werden (Abbildung 3). Für die Planung von Flotten mit alternativen Busantrieben darf bei batterieelektrischen Bussen nicht nur von den heutigen, am Markt verfügbaren Batterien ausgegangen werden. Bei einer langfristigen Flottenumstellung, die sich meist über mehr als zehn Jahre vollzieht, ist zu berücksichtigen, welche Batteriekapazitäten bei gleichem Einbauvolumen zukünftig verfügbar sein werden. Mit steigenden Batteriekapazitäten wird die Elektrifizierung von längeren Bustageseinsätzen möglich. Daher ist die Prognose

der verfügbaren Technologie für eine alternative angetriebene Busflotte im Zieljahr (z.B. Jahr 2030 oder 2035) notwendig.

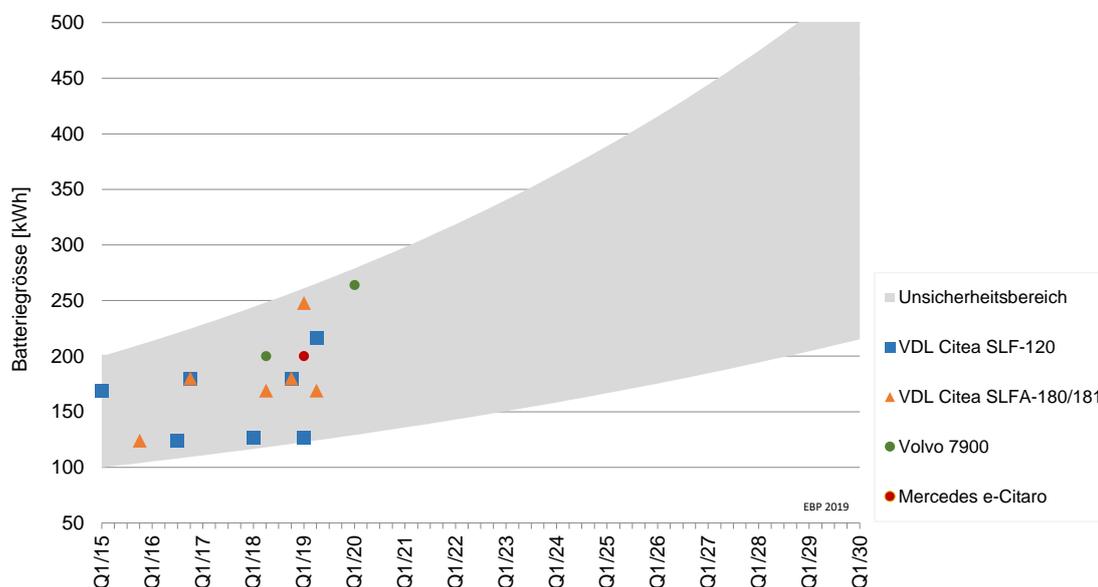


Abbildung 3: Entwicklung der Batteriekapazitäten von batterieelektrischen Bussen (Stand: Januar 2020)

### 3.2 Heiz- und Klimatisierungstechnologien

In ländlich-touristischen Bergregionen sind im Jahresverlauf grosse Schwankungen der Aussentemperaturen (etwa  $-25^{\circ}\text{C}$  bis  $+30^{\circ}\text{C}$ ) zu beobachten, so dass die Beheizung und Klimatisierung von Linienbussen eine Herausforderung darstellen.

Während bei konventionellen Dieselmotoren die Motorabwärme zur Beheizung des Fahrgastraumes stets anfällt, muss bei alternativen Busantrieben über andere Heizungsformen nachgedacht werden. Die eingesetzten Elektromotoren bei Brennstoffzellen- und Batteriebusen produzieren nur wenig Abwärme. Die einzige Wärmequelle, die bei alternativen Busantrieben weiterhin vorliegt, ist die Fahrzeugbremse. Diese wird bei einigen Herstellern bereits als Wärmequelle über einen Bremswiderstand genutzt, aber reicht nicht als alleinige Wärmequelle aus.

Die technisch einfachste Heizvariante ist der Einsatz einer **Elektrowiderstandsheizung**, bei welcher Strom durch einen Glühwendel geleitet wird und Wärme an die Umgebungsluft oder einen Wasserkreislauf abgibt. Die Elektrowiderstandsheizung ist die ineffizienteste Heizungslösung, da sie hochwertige Elektrizität in Wärme umwandelt. Die Stromversorgung der Elektrowiderstandsheizung erfolgt entweder durch die Fahrzeugbatterie oder die Brennstoffzelle. Im Fall der Batterie muss beim Einsatz einer Elektrowiderstandsheizung die Batterie überdimensioniert werden bzw. es steht dann für den reinen Fahrbetrieb weniger elektrische Energie zu Verfügung. Dieser Umstand muss berücksichtigt werden, wenn – wie in ländlich-touristischen

Bergregionen – ein anspruchsvoller Fahrtbetrieb und hohe Heizbedarfe zusammenkommen.

Viele Bushersteller bieten zur Entlastung der Fahrzeugbatterie **Zusatzheizungen mit (Bio-)Diesel oder Bioethanol** an. Diese emittieren zwar in geringem Masse CO<sub>2</sub> und weitere Luftschadstoffe, aber führen im Zusammenspiel mit einem alternativen Busantrieb weiterhin zu erheblich geringeren Emissionen als ein konventioneller Dieselbus (vgl. Kapitel 5). In der Regel kommen Zusatzheizungen nur im Winterhalbjahr bei Temperaturen unter etwa 5°C zum Einsatz.

In neueren batterieelektrischen Bussen sind **Wärmepumpen** zu finden, die sowohl zum Heizen als auch (im umgekehrten Betrieb) zum Kühlen genutzt werden. Im Vergleich zu Elektrowiderstandsheizungen arbeiten Wärmepumpen effizienter: Sie nehmen Energie der Aussenluft bei einem niedrigen Temperaturniveau auf und fügen dieser Energie durch Kompression weitere Energie hinzu, so dass anschliessend ein höheres Temperaturniveau vorliegt. Auf diesem Temperaturniveau kann dann die Innenluft geheizt werden. Da bei einer Wärmepumpe die in der Aussenluft gespeicherte Wärme genutzt wird, wird insgesamt weniger zusätzliche Elektrizität als bei einer Elektrowiderstandsheizung zum Heizen benötigt. Die meisten Hersteller garantieren einen ausreichenden Heizbetrieb ihrer Wärmepumpen bis etwa 5°C. Darunter ist eine Zusatzheizung nötig.

Bereits im Pilottests (z.B. im Swisstrolley+ von Hess und VBZ) befinden sich **Infrarotheizungen**. Hierbei werden gezielt Sitzplätze von oben mit infraroter Wärme bestrahlt, so dass die Passagiere direkt gewärmt werden, statt den Fahrgastraum vollständig zu beheizen.

Im Bereich der Fahrzeugklimatisierung wird bei alternativ angetrieben Bussen wie bei konventionellen Dieselbussen auf Klimaanlage mit Kompressoren gesetzt. Diese Anlagen funktionieren umgekehrt wie eine Wärmepumpe.

Insgesamt führt die Verknüpfung verschiedener Aggregate zu steigender Energieeffizienz bei der Heizung und Klimatisierung der Fahrzeuge. Zunehmend setzen Bushersteller auf integrierte Heiz- und Klimatisierungskonzepte, bei denen mehrere Heizsysteme – z.B. Bremswiderstandsheizung, Wärmepumpe und Elektrowiderstandsheizung) – einander je nach Aussen-temperatur ergänzen und Kühlsysteme gekoppelt für den Fahrzeuginnenraum und die Batteriekühlung genutzt werden.

## 4. Technische Bewertung: Flottenmodellierung

Dieses Kapitel zeigt auf, wie die technologischen Optionen für eine Umstellung auf alternative Busantriebe (Kapitel 3) mit den Einsatzbedingungen eines Busbetriebs in der ländlich-touristischen Bergregion abgeglichen werden. Die Leitfrage der technischen Bewertung lautet:

*Welches alternative Antriebskonzept ist aus technischer Sicht realistisch vor Ort einsetzbar?*

Bei der Bewertung helfen zwei Grundannahmen, um zu einer realistischen, technischen Lösung zu gelangen:

### 1. Busflotten mit einheitlicher Antriebstechnologie sind zu bevorzugen

Je mehr verschiedene Busantriebe in einem Transportunternehmen (TU) genutzt werden, desto höher sind die zu erwartenden Kosten für eine Flottenumstellung und den Betrieb. Zugleich erhöhen mehrere Technologien die betriebliche Komplexität, weil dann nicht alle Busse auf allen Linien eingesetzt werden können. Insbesondere bei den typischerweise kleinen Busflotten in ländlich-touristischen Bergregionen sind mehrere Antriebstechnologien daher wenig sinnvoll. Wenn beispielsweise eine Buslinie für den Betrieb mit Depotladern zu anspruchsvoll ist und dafür Streckenlader gewählt werden, liegt es nahe, auch für den Betrieb der übrigen Buslinien ein Streckenlader vorzusehen.

### 2. Gegenwärtiger Linien- und Fahrplan als Grundlage

Alle Verkehrsverbünde und Transportunternehmen haben über Jahrzehnte den Linienplan, die Taktungen und Umlaufzusammensetzungen optimiert. Da eine Einführung alternativer Busantriebe grundsätzlich erhebliche Umstellungen verursacht, sollte sich die technische Bewertung am gegenwärtigen Linienbetrieb (inkl. absehbarer Änderungen) orientieren. Auch wenn auf längere Frist ein Ausbau des Angebots denkbar oder wahrscheinlich ist, ändert dies meist wenig an den Anforderungen an die Fahrzeuge, so dass der gegenwärtige Zustand als auch für die Zukunft repräsentativ angenommen werden darf.

### 3. Auf Elektrobusse optimierte Bus-Umläufe prüfen

Die Tagesreichweite von Dieselnissen ist so gross, dass ein Fahrzeug den ganzen Tag den Grundtakt bedienen kann. Batterieelektrische Busse können solche Reichweiten auf absehbare Zeit nicht leisten. Für eine kostenoptimale Elektrifizierung von Busflotten sollten Betriebsvarianten geprüft werden, bei denen zu hohe Tagesreichweiten vermieden und Busse tagsüber nachgeladen werden können.

## 4.1 Konzept der Flottenmodellierung

Mit flüssigen Treibstoffen wie Diesel und Wasserstoff tauchen bei Bussen meist keine Einschränkungen bei der Reichweite auf, da flüssige Treibstoffe eine hohe Energiedichte aufweisen und in kurzer Zeit nachgetankt werden können. Bei batterieelektrischen Bussen hingegen ist die Reichweite einerseits durch die Kapazität der Batterie und andererseits durch den erheblichen Zeitbedarf von Ladevorgängen aufgrund der maximalen C-Rate derzeit beschränkt.

Deshalb ist im Rahmen einer technischen Bewertung von alternativen Busantrieben der elektrische Energiebedarf und die Lademöglichkeiten von batterieelektrischen Bussen besonders zu analysieren und Fokus der hier dargestellten Flottenmodellierung. Hierbei ist das Ziel herauszufinden, welche heutigen Tageseinsätze durch batterieelektrische Busse mit der heutigen und zukünftig verfügbaren Batterietechnologie (vgl. Kapitel 3.1) ersetzt werden können.

Die Betrachtung der heutigen und zukünftig verfügbaren Bustechnologie, insbesondere Batteriekapazitäten und Leistungsabgabe der Ladetechnologie ist in dieser Modellierung zentral. Nur so kann sichergestellt werden, dass eine Umstellung der Antriebstechnologie langfristig auf möglichst wenige Einzeltechnologien hinsteuern kann und nicht beim Betrieb weniger Fahrzeuge stehenbleibt.

Im Rahmen der Flottenmodellierung sollten vollständige Tageseinsätze betrachtet werden, die – je nach TU – eine Verknüpfung von mehreren Linienfahrten und Umläufen sind und das vollständige Bild des Energiebedarfs der Busse über einen Tag abgeben (Abbildung 4). Gleichzeitig können aus den Angaben der Tageseinsätze mögliche Pausen und entsprechende Energiemengen für Nachladungen im Depot und auf der Strecke identifiziert werden.



Abbildung 4: Hierarchie von Linien, Umläufen und Tageseinsätzen

Aus den Informationen der Energiebedarfe und Nachladungen der Tageseinsätze kann abgeleitet werden, wie viele Tageseinsätze sich mit batterieelektrischen Depotladern und Streckenladern elektrifizieren lassen. Damit werden die Tageseinsätze entsprechend drei Kategorien zugeteilt (Abbildung 5):

1. Ein Tageseinsatz lässt sich allein mit Depotladern (D) elektrifizieren
2. Es ist neben dem Laden im Depot zusätzlich ein Streckenlader (S) notwendig, um den Tageseinsatz zu elektrifizieren
3. Ein Tageseinsatz ist hinsichtlich des Energiebedarfes und Ladepotenzials zu anspruchsvoll, um elektrifiziert zu werden, so dass man ihn als «Heavy Duty» (H) (engl. Hochleistung/Schwerlast) bezeichnen kann.

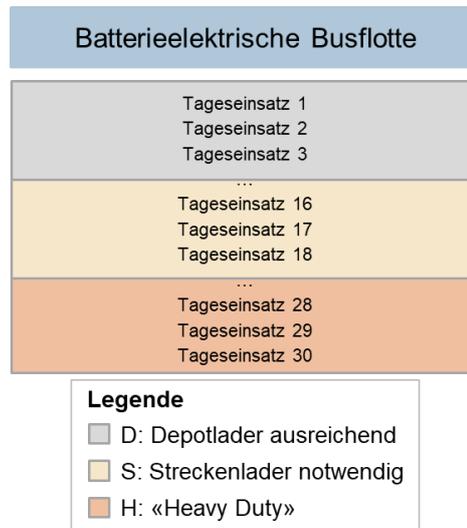


Abbildung 5: Einteilung einer batterieelektrischen Busflotte

## 4.2 Einsatzsituation und Betriebsdaten

Die Einsatzsituation von Bussen hat einen grossen Einfluss auf ihren Energieverbrauch und beeinflusst dadurch die technische Machbarkeit einer Umstellung auf alternative Busantriebe, insbesondere auf batterieelektrische Busse.

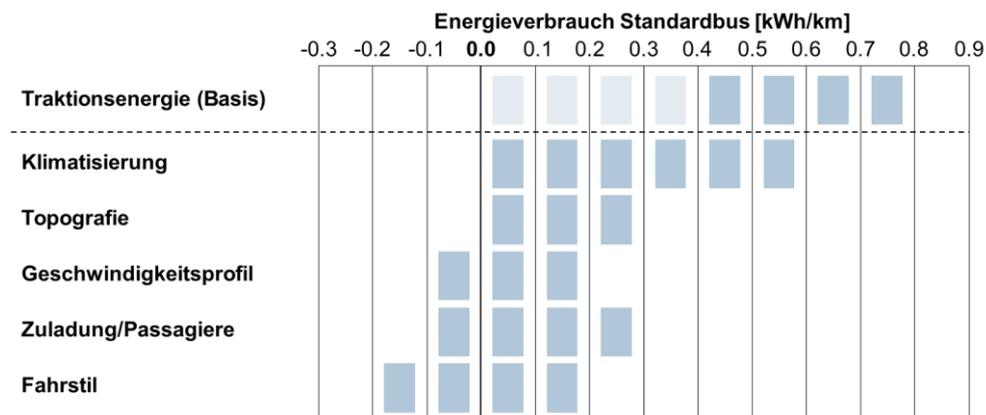


Abbildung 6: Einfluss der Einsatzcharakteristika auf den Energieverbrauch (Standardbus 12m), Quelle: EBP-Analyse, VDL Group

Abbildung 6 zeigt schematisch auf, in welcher Grössenordnung verschiedene Charakteristika der Einsatzsituation den Energieverbrauch von Bussen beeinflussen. Dabei stellt die Traktionsenergie den Basisenergieverbrauch dar, während Klimatisierung, Topografie, Geschwindigkeitsprofil, Zuladung und Fahrstil als Zu- oder Abschläge zu verrechnen sind. Dabei kann beispielsweise ein vorausschauender Fahrstil mit moderaten Beschleunigungsphasen den Verbrauch senken. Insgesamt lässt sich erkennen, dass die Traktionsenergie, die Fahrzeugklimatisierung und die zu bewältigende Topografie im Betrieb den grössten Einfluss auf den Verbrauch haben. Genau diese drei Einsatzcharakteristika sind es, die den Betrieb von batterieelektrischen Bussen in ländlich-touristischen Bergregionen herausfordernd

machen: Hier finden viele Überlandfahrten mit gleichzeitig herausfordernden Steigungsprofilen statt. Und zugleich erzeugen grosse Temperatur-Schwankungen über das Jahr (etwa  $-25^{\circ}\text{C}$  bis  $+30^{\circ}\text{C}$ ) einen hohen Bedarf an Klimatisierung und Heizung. Als weiterer Faktor erhöhen lange Tageseinsätze mit hohen Fahrleistungen den Tagesenergieverbrauch der Busse.

Für eine Flottenmodellierung ist es wichtig, die real im Linienbetrieb vorliegenden Einsatzcharakteristika abzuklären. Es sollte analysiert und sichergestellt werden, dass alternative Busantriebe alle typischen Betriebsfälle und die Extremfälle im Winter und Sommer bewerkstelligen können.

Da die Beheizung des Busses im Winter in ländlich-touristischen Bergregionen einen sehr hohen Verbrauch verursachen kann, sollte hier von vornherein über alternative Heizungssysteme nachgedacht werden (vgl. Kapitel 3.2). Insbesondere Zusatzheizungen mit (Bio-)Diesel oder Bioethanol können eine technische Lösung für kurze, extreme Kältezeiten während des Tages sein und die Batteriekapazität der Busse erheblich entlasten.

Um das vorliegende Liniennetz und die Umläufe der jeweiligen Bergregion oder des Verkehrsbetriebs in der Flottenmodellierung abbilden zu können, werden folgende Betriebsdaten benötigt:

- Das Liniennetz mit allen Haltestellen, inkl. Streckenlänge und Steigung zwischen den Haltestellen und Wartezeiten an (End-)Haltestellen
- Die Tageseinsätze der Fahrzeuge, bestehend aus bedienten Umläufen und Linien und unter Angabe der genutzten Gefässgrösse

### 4.3 Modellierung und Energiebilanzierung

Nach Bestimmung der Einsatzsituation und unter Nutzung der Betriebsdaten, kann die Modellierung einer batterieelektrischen (oder auch alternativen) Busflotte erfolgen. Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, soll die Modellierung zeigen, welche Tageseinsätze der Busse sich batterieelektrisch mit Depotladern (D), Streckenladern (S) oder nur schwer/ mit Umstellungen (H) bewältigen lassen. Dazu wird zunächst der zu erwartende Stromverbrauch pro Tageseinsatz berechnet. Folgende Schritte werden während der Analyse vollzogen:

1. **Spezifischer Stromverbrauch:** Entsprechend der Einsatzsituation wird mit Hilfe verschiedener Herstellerdaten (z.B. von Evobus, Hess, VDL und Volvo) und Studien (akademische Publikationen und Veröffentlichungen des BAV) der zu erwartende Stromverbrauch pro Kilometer je Gefässgrösse und Steigungsklasse bestimmt.
2. **Stromverbrauch pro Tageseinsatz:** Es werden jedem Streckenabschnitt zwischen einzelnen Haltestellen entsprechend der Streckenlänge und dem Höhenunterschied (=Steigung) ein Stromverbrauch entsprechend der Gefässgrösse zugeordnet.
3. **Lademengen für Streckenlader:** Bei jedem Tageseinsatz werden Zeitfenster identifiziert, die zum Laden während des Einsatzes nutzbar sind. Davon sind jeweils die Zeiten für Verbindung und Entkopplung der Ladeverbindung abzuziehen. Mit Hilfe der Ladeleistung der Streckenlader

(heute und zukünftig verfügbar) wird berechnet, wie viel Energie jeweils pro Tageseinsatz unterwegs nachgeladen werden könnte.

4. **Abgleich von Tagesstrombedarf und Batteriegrößen:** Mit dem täglichen Stromverbrauch und den Lademengen für Streckenladen wird ermittelt, wie gross der Tagesstrombedarf ist, wenn man nur auf Depotlader (D) setzt oder unterwegs noch Zwischenladungen mit Streckenladern (S) ermöglicht. Der Tagesstrombedarf für D und S wird mit den Batteriegrößen heutiger und zukünftig prognostizierter Busse verglichen, um festzustellen, wie viele Tageseinsätze in die Kategorien D, S und H fallen.

Die Ergebnisse der Flottenmodellierung können anschliessend in einer Auswertung, wie in Abbildung 7 dargestellt werden. Neben einem Basisszenario können verschiedene Alternativszenarien modelliert werden, die aufzeigen, wie sensitiv die Resultate auf betriebliche Änderungen, wie beispielsweise den Einsatz Zusatzheizungen und längeren Wartezeiten, reagieren. Abbildung 7 zeigt, dass der Einsatz einer Zusatzheizung und 20 % zusätzlichen Wartezeiten zum Laden «Heavy Duty»-Tageseinsätze eliminiert und zugleich die Anzahl der Tageseinsätze, die ein zusätzliches Streckenladen benötigen, von 24 auf 17 reduziert. Schliesslich lassen sich 13 statt nur 3 Tageseinsätze mit Depotladen elektrifizieren.

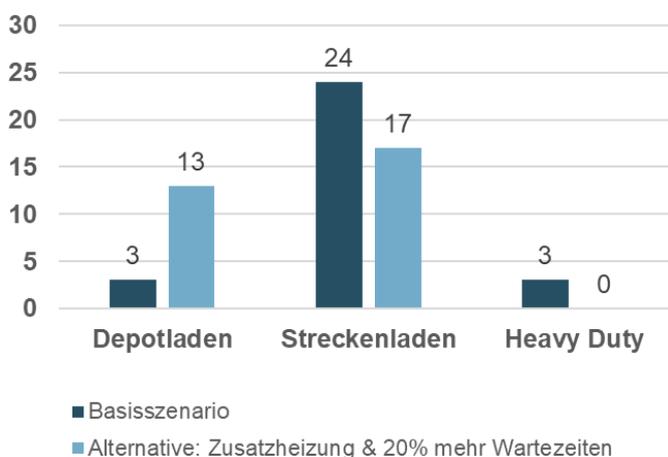


Abbildung 7: Auswertung der Elektrifizierbarkeit der Busflotte am Beispiel Oberengadin (insgesamt 30 Tageseinsätze, Analyse für das Jahr 2035)

In Abbildung 8 sind Massnahmen aufgezeigt, die dabei helfen können mit dem limitierenden Faktor «Batteriekapazität» umzugehen. Dabei dienen die Massnahmen dazu, dass entweder mehr Ladeenergie in die Fahrzeugbatterien gelangen kann oder der Tagesverbrauch an Energie gesenkt wird.

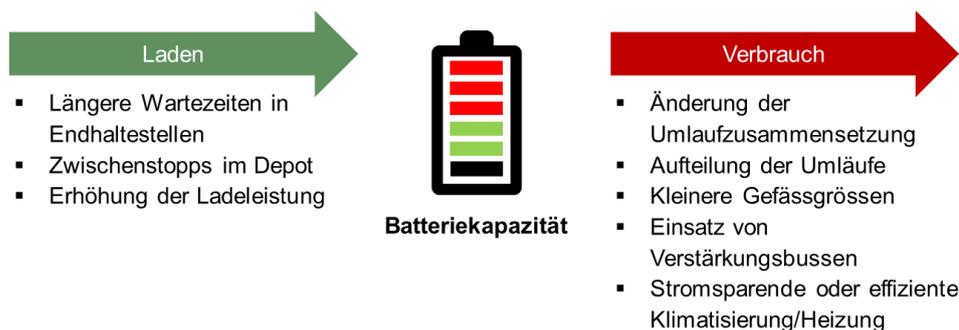


Abbildung 8: Massnahmen zur Erleichterung der Elektrifizierbarkeit von Bus-Tageseinsätzen

Insgesamt lässt sich mit der Flottenmodellierung verstehen, welche Ladeart für eine Busflotte infrage kommt und welche Massnahmen zur Erleichterung der Elektrifizierbarkeit genutzt werden sollten. Abschliessend lässt sich zudem ableiten, wie viele Fahrzeuge aus technischer Sicht als Depotlader, respektive Streckenlader benötigt werden und welche Ladeinfrastrukturen hierfür anzuschaffen wären. Diese Informationen sind für die folgende wirtschaftliche Bewertung (Kapitel 0) und nicht zuletzt aus Sicht der Beschaffung relevant.

#### 4.4 Erkenntnisse für ländlich-touristische Bergregionen

Trotz der Spezifität der Tageseinsätze und Einsatzsituationen von Linienbussen in den verschiedenen Bergregionen der Schweiz, lassen sich allgemeine Erkenntnisse für ländlich-touristische Bergregionen aus der Flottenmodellierung gewinnen:

##### **Technologisch ist eine 100% Elektrifizierung möglich**

Trotz der extremen Anforderungen des Fahrbetriebs und der Klimatisierung/Heizung ist eine vollständige Elektrifizierung der Fahrzeugflotte in Bergregionen technisch möglich. Voraussetzung dafür ist die Nutzung von Streckenladern und der Einbau von Zusatzheizungen in den Fahrzeugen. Bei Liniennetzen, bei denen eine im Vergleich zur Fahrleistung hohe Anzahl Streckenladestationen errichtet werden müsste und keine zentrale Streckenladestationen geteilt werden können, kann es langfristig wirtschaftlicher sein, auf Wasserstoff-Brennstoffzellenbusse zu setzen. Die Mehrkosten für den Wasserstoff-Treibstoff würden kompensiert durch die Einsparungen bei der Ladeinfrastruktur. Aus Sicht der Wirtschaftlichkeit verglichen mit dem heutigen System, müssen allerdings die Fahrzeuge mit Brennstoffzelle im Ankauf und Betrieb noch erheblich günstiger werden.

##### **Zusatzheizungen sind notwendig**

Zusatzheizungen mit (Bio-)Diesel oder Bioethanol können eine technische Lösung für kurze, extreme Kältezeiten während des Winters sein und die geforderte Batteriekapazität der Busse erheblich entlasten. Dadurch können weitaus mehr Tageseinsätze elektrifiziert werden, die sonst im Winter zu hohe Stromverbräuche für eine Elektrifizierung aufweisen würden. Hier unterscheiden sich ländlich-touristische Bergregionen wesentlich von Städten und Agglomerationen.

### **Herausfordernde Dimensionierung der Busflotte und Ladeinfrastruktur**

Obwohl die technische Machbarkeit einer 100 %-Elektrifizierung der Busflotte in Bergregionen gegeben ist, schlagen sich ein allfälliger Mehrbedarf an Fahrzeugen sowie die notwendige Ladeinfrastruktur in den Busdepots und entlang der Busstrecken in den Kosten nieder. Neben der technischen und ökologischen (siehe Kapitel 5) Betrachtung ist daher auch eine differenzierte ökonomische Analyse (siehe Kapitel 6) durchzuführen.

#### **Strombedarf und Versorgungssicherheit**

Durch eine Umstellung auf batterieelektrische Busse kommt es zu einem erheblichen Mehrbedarf an elektrischer Energie in ländlich-touristischen Bergregionen. Dazu eine kurze Beispielrechnung, um die zu erwarteten Strommehrbedarfe einzuordnen:

Ausgehend von einer durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 70'000 km/a und einem durchschnittlichen Fahrzeugverbrauch von 1.7 kWh/km eines 12m-Standardbusses, erhält man einen jährlichen Energiebedarf von rund 120 MWh/a pro umgestellten Standardbus. Dies entspricht etwa dem jährlichen Haushaltsstrombedarf von 25 Vier-Personen-Haushalten. Somit ergibt sich bei einer Flotte von 20 *Standardbussen ein jährlicher Strombedarf von 2.4 GWh/a, was 250 Haushalten entspricht.*

Diese hohen Strombedarfe können dazu führen, dass ein Busbetreiber zu einem der grössten Energieverbraucher in der jeweiligen Region wird! Durch den erheblichen Strombedarf kann es deshalb zu Ausbaubedarf im Verteilnetz bei Stromleitungen und Transformatorstationen kommen. In der Zusammenarbeit mit einem lokalen Energieversorger im hier zugrundeliegenden Projekt hat sich allerdings nicht gezeigt, dass die Beschaffung der nötigen Strommengen problematisch ist, da Strom schweizweit gehandelt und übertragen wird. Die Versorgungssicherheit mit Strom der ländlich-touristischen Bergregionen wird durch eine Umstellung auf batterieelektrische Busse nicht beeinträchtigt.

## 5. Ökologische Bewertung: Lebenszyklusanalyse

Hauptmotivation für die Umstellung auf alternative Busantriebe bei Linienbussen sind die Reduktion der Treibhausgase und der damit verbundene Klimaschutz, die Reduktion lokaler Schadstoffe zur Luftreinhaltung sowie der Lärmschutz. Deshalb ist es einerseits wichtig zu überprüfen, welche Treibhausgasemissionen im Vergleich zu herkömmlichen Dieselantrieben eingespart werden können und ob es andererseits andere Schadstoffe (z.B. Feinstäube, Stickoxide) gibt, die bei einem Systemwechsel vermehrt auftreten, oder ob dort ebenfalls Einsparungen realisiert werden können. Anhand einer spezifischen Lebenszyklusanalyse, die alle Schadstoffauswirkungen aufzeigen kann, soll diese Fragestellung geklärt werden.

### 5.1 Konzept der Lebenszyklusanalyse

Eine Lebenszyklusanalyse (engl. life cycle assessment, kurz: LCA) ermittelt die Umweltauswirkungen aller Komponenten über die Lebensphasen eines Produktes hinweg. Dazu gehören sämtliche Umweltwirkungen während der Produktion, der Nutzungszeit und der Entsorgung des Produktes sowie die damit verbundenen vor- und nachgeschalteten Prozesse (z. B. Herstellung der Rohstoffe für Batterien oder Stromproduktion). Zu den Umweltwirkungen werden sämtliche umweltrelevanten Entnahmen aus der Umwelt (z. B. Erze, Rohöl) sowie die Emissionen in die Umwelt (z. B. Abfälle, Kohlendioxidemissionen) gezählt.

In einer LCA werden sog. Einflusskategorien (midpoint impact categories) wie Treibhausgasemissionen, Feinstaubemissionen und Wassernutzung berechnet, die anschliessend zu sog. Endpunkten (endpoint areas of protection) aggregiert werden. Diese Endpunkte geben an, welches Schadenspotenzial für die Umwelt, menschliche Gesundheit und die Ressourcenverfügbarkeit besteht. Abschliessend lassen sich durch wissenschaftliche Gewichtung die Endpunkte zueinander in Vergleich setzen und zu einer Gesamtbewertung zusammenfassen (ReCiPe 2016).

Um die Umweltauswirkungen der verschiedenen Antriebsarten von Linienbussen zu vergleichen, werden die Umweltauswirkungen pro gefahrenem Fahrzeugkilometer aufgezeigt. Die Definition dieser sog. funktionellen Einheit zielt darauf ab, den Service – die erbrachte Fahrleistung – zu vergleichen. Damit ist deutlich, dass nicht nur die Fahrzeuge in der Analyse zu berücksichtigen sind, sondern auch unterschiedliche Lebensdauern von verschiedenen Antriebssystemen, verschiedene Ersatzteile während des Fahrzeuglebens (z.B. Ersatzbatterien) und verschiedene Treibstoffe.

### 5.2 Dimensionen und Parameter der Lebenszyklusanalyse

Da eine LCA alle Lebensphasen eines Produktes mit allen vor- und nachgelagerten Prozessen abbilden, sollte bei bereits bekannten Prozessen auf Datenbanken und Expertenwissen zurückgegriffen werden, um sinnvolle Annahmen für eine Berechnung zu treffen. Für die LCA von Linienbussen sind einerseits verschiedene Dimensionen zu wählen, entlang derer die Umweltauswirkungen verglichen werden, und andererseits relevante Parameter der

Fahrzeuge und des Betriebs zu definieren. Diese Dimensionen und Parameter (z.B. Batteriegrösse und Stromverbrauch der batterieelektrischen Busse) sind so zu definieren, dass sie mit den Annahmen der Flottenmodellierung (Kapitel 4.1) übereinstimmen.

Die wichtigen **Dimensionen** für den Vergleich der Umweltauswirkungen sind:

- Antriebsarten
- Gefässgrösse des Linienbetriebs
- Mögliche Strommixe zum Laden und/ oder zur Wasserstoffelektrolyse
- Mögliche Heizungssysteme

Die relevanten **Parameter** für die LCA der Linienbusse sind:

- Lebens-/ Betriebsdauer der Linienbusse
- Jährliche Fahrleistung nach Gefässgrösse
- Motorleistungen nach Antriebsart und Gefässgrösse
- Repräsentative SORT-Fahrzyklus<sup>5</sup> des Linienbetriebs
- Durchschnittliche Steigungsklasse des Linienbetriebs
- Fahrzeuggewicht nach Antriebsart und Gefässgrösse
- Leistung der typischen Heiz-/Klimatisierungssysteme nach Antriebsart und Gefässgrösse

Speziell für batterieelektrische Busse ist zu definieren:

- Grössen und Zellchemien der Fahrzeugbatterie
- Fällige Batteriewechsel während des Lebenszyklus
- Produktionsort der Fahrzeugbatterie
- Ggf. Rekuperationseffizienz

### 5.3 Erkenntnisse für ländlich-touristische Bergregionen

Die LCA für ländlich-touristische Bergregionen wurde gemeinsam von EBP und dem Paul Scherrer Institut (PSI) entwickelt. Das PSI gilt als schweizweit und international anerkanntes Forschungsinstitut, dessen Expertise regelmässig für ökologische Fragestellungen und Lebenszyklusanalysen herangezogen wird. Die allgemein übertragbaren Ergebnisse der LCA für ländlich-touristische Bergregionen sind in den Abbildungen 11 bis 14 zu sehen.

Die gesamten Umweltauswirkungen der Antriebsarten Diesel, Dieselhybrid, Wasserstoff-Brennstoffzelle, Depotlader und Streckenlader sind in Abbildung 9 zu sehen. Dabei schneiden Dieselbusse mit knapp 0.1 ReCiPe-Umweltpunkten pro km am schlechtesten ab, während Hybridbusse etwa 20% besser abschneiden. Die drei Antriebsarten Wasserstoff-Brennstoffzelle, Depotlader und Streckenlader stehen im Gesamtvergleich erheblich besser da und ermöglichen eine Reduktion von etwas mehr als 80 % der Umweltauswirkungen ggü. Dieselmussen, wenn im Betrieb ein erneuerbarer Strommix (95 % Wasserkraft und 5 % Solar, Wind und Biomasse) genutzt wird.

---

5 SORT: Standardisierte Testzyklen für den Betrieb von Linienbussen, mit den Testzyklen SORT 1 (Stadtbetrieb), SORT 2 (Vorortbetrieb) und SORT 3 (Überlandbetrieb)

Der Unterschied zwischen den drei alternativen Antriebsarten und Dieselsebussen fällt geringer aus, wenn man den Strommix verändert, der zum Laden und zur Elektrolyse des Wasserstoffs genutzt wird (Abbildung 10). Aber auch mit dem schweizerischen Konsumentenmix (d.h. durchschnittlicher Strommix, der im Mittel im schweizerischen Stromnetz vorliegt) können die Umweltauswirkungen im Vergleich zum Dieselsebus um etwa 60 % bei Wasserstoffbussen und knapp 70 % bei batterieelektrischen Bussen reduziert werden.

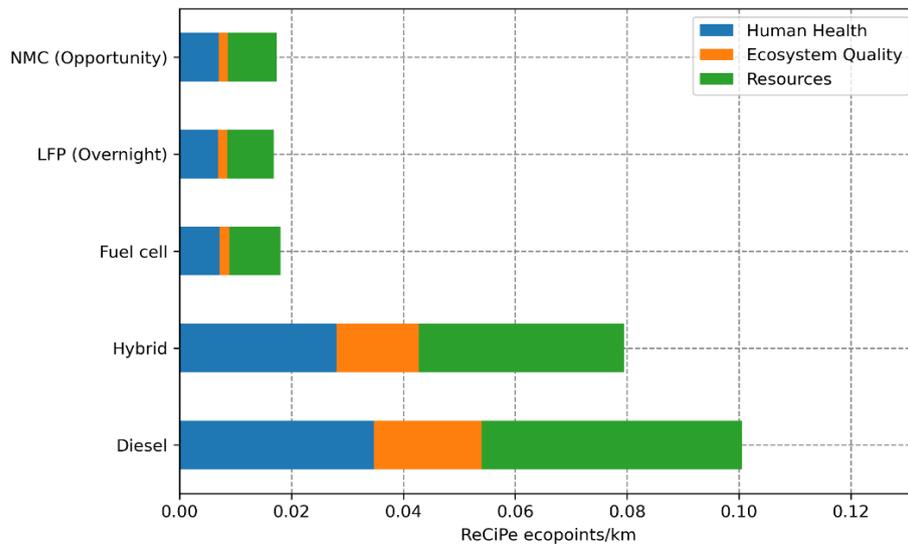


Abbildung 9: Gesamte Umweltauswirkungen über den Lebenszyklus in ReCiPe-Umweltpunkten je Antriebsart (Hierarchische Aggregation nach ReCiPe-Methodik) (Annahmen: 12m Standardbus, Winterbetrieb, erneuerbarer Strommix)

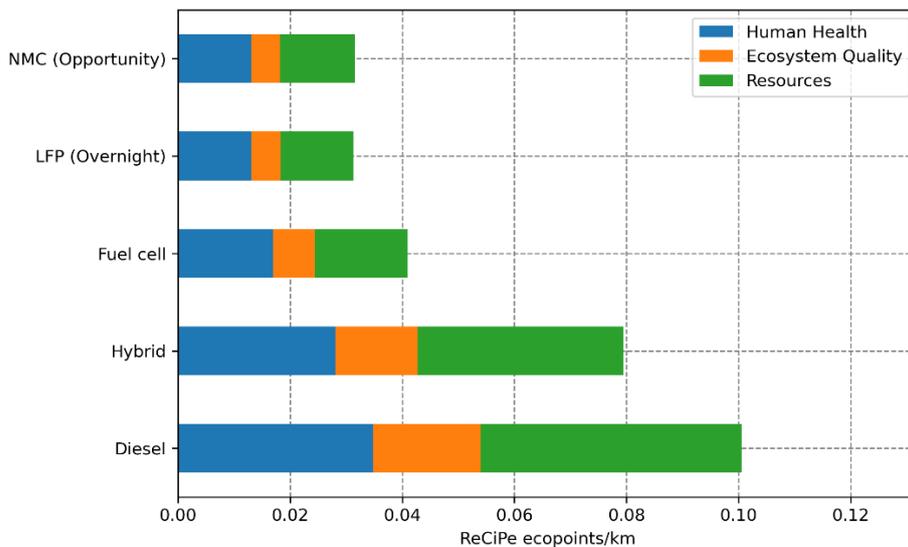


Abbildung 10: Gesamte Umweltauswirkungen über den Lebenszyklus in ReCiPe-Umweltpunkten je Antriebsart (Hierarchische Aggregation nach ReCiPe-Methodik) (Annahmen: 12m Standardbus, Winterbetrieb, durchschnittlicher schweizerischer Konsumentenstrommix)

Mit Blick auf die Treibhausgasemissionen<sup>6</sup> sind erhebliche Verbesserungen bei alternativen Antrieben zu beobachten (Abbildungen 13 & 14). Mit Hybridbussen lassen sich gegenüber dem Dieselbus etwa 25 % der Emissionen (je nach Einsatz und Auslegung) vermeiden, während Wasserstoffbusse – abhängig vom Strommix – zwischen 70 bis 90 % Treibhausgas einsparen können. Batterieelektrische Busse können zwischen 80 und 90 % Treibhausgas reduzieren. Die Bandbreite der möglichen Treibhausgasreduktionen bei Wasserstoffbussen fällt im Vergleich zu batterieelektrischen Bussen höher aus, da Wasserstoffelektrolyse ein energieintensiver und verlustreicher Prozess ist, dessen CO<sub>2</sub>-Fussabdruck mit einem CO<sub>2</sub>-intensiveren Strommix sich um einen höheren Faktor verschlechtert.

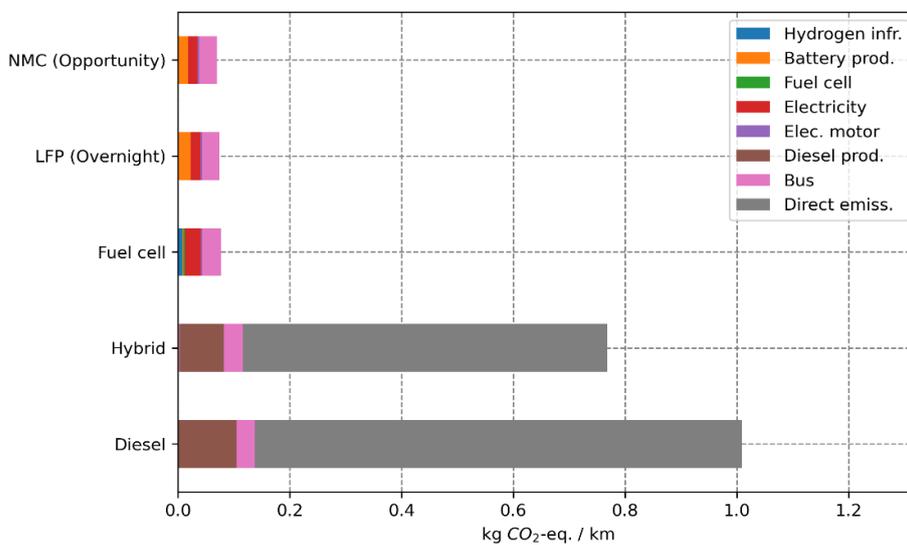


Abbildung 11: Lebenszyklus-Emissionen von Treibhausgasen je Antriebsart, Annahmen: 12m Standardbus, Winterbetrieb, Maximal erneuerbarer Strommix (Erklärung: NMC = Fahrzeugbatterie mit Kathode aus Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid, typisch für Streckenlader-Busse, LFP: Fahrzeugbatterie mit Kathode aus Lithiumeisenphosphat, typisch für Depotlader-Busse)

6 Ausgedrückt als CO<sub>2</sub>-Äquivalente (CO<sub>2</sub>-eq).

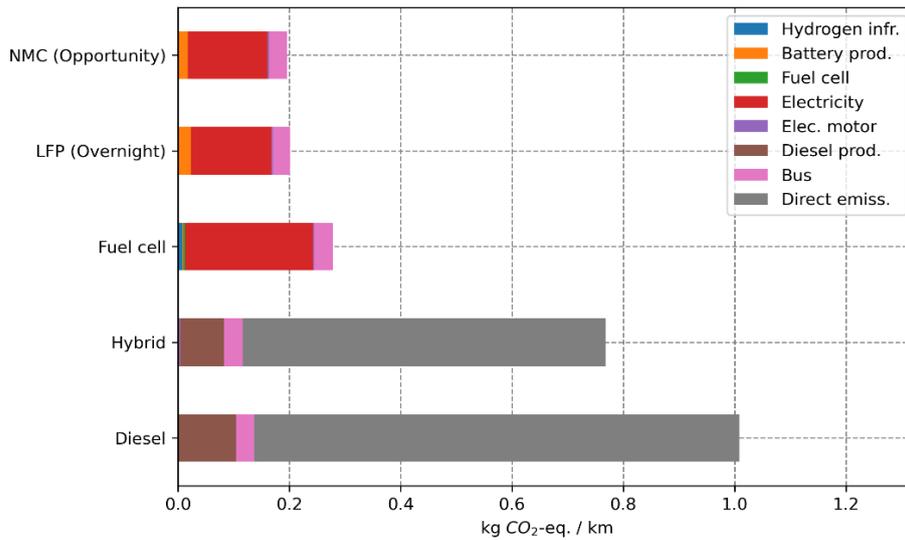


Abbildung 12: Lebenszyklus-Emissionen von Treibhausgasen je Antriebsart, Annahmen: 12m Standardbus, Winterbetrieb, Schweizerischer Konsumentenmix

Der Einfluss der Benutzung einer Zusatzheizung bei batterieelektrischen Bussen auf die Treibhausgasemissionen ist in Abbildung 13 abgebildet. Bei der Benutzung einer elektrischen Zusatzheizung steigen die Emissionen nur geringfügig an. Wenn Zusatzheizungen mit Gas oder Diesel betrieben werden – der potenziell CO<sub>2</sub>-intensivste Betriebsfall – steigen die Treibhausgasemissionen an. Trotz Gas- oder Dieseltreibstoff der Zusatzheizung sind allerdings immer noch Reduktionen von Treibhausgasemissionen gegenüber. Dieseltaxis von etwa 70 % möglich. Folglich trägt selbst ein batterieelektrischer Bus mit Zusatzheizung beim Betrieb mit fossilen Treibstoffen erheblich zum Klimaschutz bei. Gleichzeitig schont eine Zusatzheizung die Batteriekapazität der Busse und erlaubt mehr elektrische Energie zum Antrieb der Busse zu nutzen.

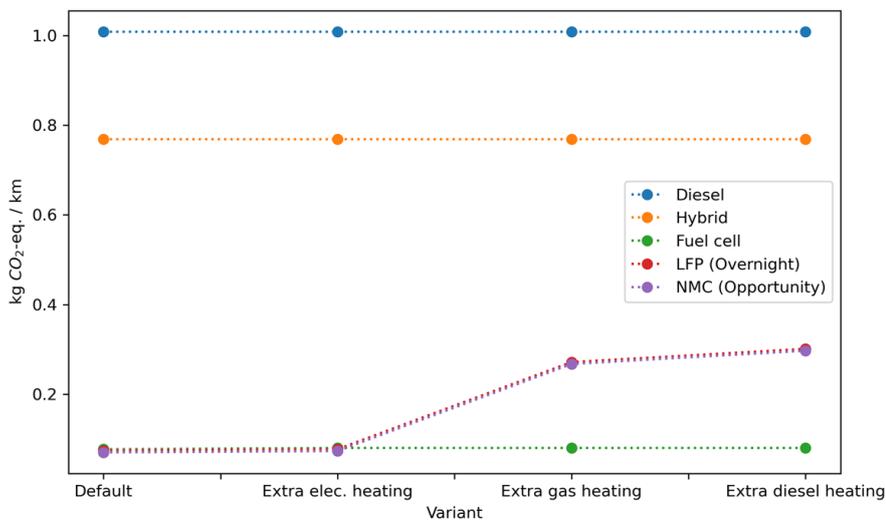


Abbildung 13: Einfluss von Zusatzheizungen in batterieelektrischen Bussen auf die Lebenszyklus-Emissionen von Treibhausgasen (in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten)

Alle alternativen Antriebsarten weisen im Vergleich zum Dieselbus geringere Gesamtweltauswirkungen auf und bewirken erhebliche Einsparungen bei den Treibhausgasemissionen. Folgende Verbesserungen können im Vergleich zum Dieselbus erzielt werden (Tabelle 2):

Antriebsart	Umweltauswirkungen	Treibhausgasemissionen
Hybrid	-21%	-24%
Wasserstoff-Brennstoffzelle	-59 bis -82%	-72 bis -93%
Batterieelektrisch (Depotlader)	-69 bis -83%	-80 bis -93%
Batterieelektrisch (Streckenlader)	-69 bis -83%	-81 bis -93%

Tabelle 2: Zusammenfassung der möglichen Reduktionen von Umweltauswirkungen und Treibhausgasemissionen alternativer Busantriebe gegenüber Dieseln

### Fazit

Zusammenfassend ist ein Umstieg auf alternative Busantriebe aus ökologischer Sicht sehr vorteilhaft und kann in erheblichem Masse Treibhausgasemissionen reduzieren. Bei einem Flottenumstieg sollte zusätzlich auf einen erneuerbaren Strommix gesetzt werden, um das gesamte ökologische Potenzial nutzen zu können. Zugleich kann zur Erleichterung einer Flottenelektrifizierung auf Zusatzheizungen mit (Bio-)Diesel oder Bioethanol gesetzt werden, da trotz der Verbrennung weiterhin signifikante Reduktionen von Treibhausgasemissionen erzielt werden können.

## 6. Wirtschaftliche Bewertung: Investitionsrechnung

Nach den Bewertungen, ob es technisch möglich und ökologisch vorteilhaft ist, auf batterieelektrische Busse umzusteigen, ist ebenfalls entscheidend, ob und mit wie viel Mehrkosten ein Busbetreiber bzw. eine ländlich-touristische Bergregion bei einem Umstieg rechnen muss. Dazu sollten die Investitionskosten der batterieelektrischen Fahrzeuge und die Kosten für Ladeinfrastrukturen mit den Anschaffungs- und Treibstoffkosten von herkömmlichen Dieselnissen verglichen werden. Zudem ist der Zeitraum der Systemumstellung (z.B. 2020 bis 2035) zu berücksichtigen.

### 6.1 Konzept der wirtschaftlichen Bewertung

Bei der vergleichenden Investitionsrechnung ist zwischen einer Berechnung für die Kosten für die Fahrzeuge und für die Kosten für Ladeinfrastruktur/Treibstoff zu unterscheiden.

Für die vergleichende Investitionsrechnung der Fahrzeuge können die Kosten statisch verglichen werden, d.h. Kosten werden ohne Abzinsung nebeneinandergehalten. Dies ist für die Entscheidungsfindung und die Abschätzung der Mehrkosten legitim, da Dieselnisse und batterieelektrische Busse gleiche Lebensdauern (12 bis 14 Jahre) aufweisen und die Ersatzbeschaffungen mit den beiden Antriebsarten in einem gleichen Zeitrahmen ablaufen. Bei batterieelektrischen Bussen fällt lediglich eine Ersatzbatterie während des Fahrzeuglebens nach etwa 5 bis 7 Jahren an.

Für die vergleichende Investitionsrechnung der Ladeinfrastruktur gegenüber dem Dieseltreibstoff sollten die Kosten dynamisch gegenübergestellt werden, d.h. die Kosten werden entsprechend des Zeitpunkts, an dem Sie anfallen, abgezinst und Investitionen in Ladeinfrastruktur entsprechend ihrer Lebensdauer abgeschrieben. Nur so kann ein fairer Vergleich zwischen den Treibstoffkosten von Dieselnissen und den Treibstoffkosten von batterieelektrischen Bussen – bestehend aus Stromkosten und Ladeinfrastrukturinvestitionen – aufgestellt werden.

### 6.2 Eingangsgrößen zur wirtschaftlichen Bewertung

Für die **Investitionsrechnung der Fahrzeuge** werden folgende Informationen benötigt:

- Übersicht der geplanten Busersatze
- Kosten für batterieelektrische Fahrzeuge, je Gefässgrösse
- Kosten für Dieselfahrzeuge, je Gefässgrösse

Mit der Übersicht des geplanten Busersatzes lässt sich für batterieelektrische Busse ein Beschaffungsplan über mehrere Jahre (z.B. 2020 bis 2035) entsprechend der technischen Machbarkeit aus Kapitel 4 aufstellen. Heutige Kosten für batterieelektrische Fahrzeuge, Vorhersagen für Batteriepreise (Abbildung 3) und Aufschlüsselungen von Fahrzeugkosten (Kunith 2017) ermöglichen es, zukünftige Preise für Elektrobusse in den kommenden Jahren zu prognostizieren. In Kombination mit den Beschaffungszeitpunkten im Beschaffungsplan, werden so die Gesamtkosten für batterieelektrische Busse vorhergesagt und mit den Anschaffungskosten von Dieselnissen verglichen. Da Dieselnisse eine ausgereifte Technologie sind, ist bei ihnen von gleichbleibenden Kosten auszugehen.

### **Einbezug lokaler Energieversorgungsunternehmen**

Der Einsatz von grossen Mengen an Strom als Antriebsenergie von Bussen bedeutet, dass die Zusammenarbeit mit lokalen Energieversorgungsunternehmen (EVUs) wichtiger wird. Während in den grösseren Städten die Fahrleistung hauptsächlich im Versorgungsgebiet des stadt-eigenen Energieversorgers erfolgt, bedienen Busnetze in Agglomerationen und im ländlichen Raum meistens eine Vielzahl von Gemeinden, welche je einen örtlichen Netzbetreiber haben. Als neue Partner sollten die betroffenen EVUs deshalb frühzeitig in die Diskussionen um elektrifizierte Bussysteme einbezogen werden, um ihre elektrotechnische Expertise und planerische Kompetenz zu nutzen.

EVUs haben genaue Kenntnis über die Restkapazitäten ihrer Netzanschlusspunkte und Transformatoren und können bei der Standortdefinition von Ladeanschlüssen in Depots und entlang der Strecke unterstützen. Im Falle des angestrebten Einsatzes von Brennstoffzellenbussen ist zu prüfen, welche lokale Partner ggf. einen Elektrolyseur zur Wasserstoffproduktion betreiben. Gemeinsam können die zu erwartenden Kosten für Netzanschlüsse besprochen und gegenüber Anschlussleistung und Standortwahl abgewogen werden. Zusätzlich ist es möglich, dass EVUs aufgrund ihrer Kompetenzen die Installation, Wartung und den Betrieb der Ladeinfrastruktur übernehmen.

Dabei ist sicherzustellen, dass der Busbetreiber mit einem passenden Lademanagement zur Reduktion von Lastspitzen den betrieblich erforderlichen Zugriff auf die Ladeinfrastruktur hat.

Übernimmt das EVU die Rolle als Dienstleister, ist damit zu rechnen, dass eine gewisse Rendite (ähnliche der durch das UVEK regulierten Rendite für den Netzbetrieb von etwa 4%, Stand 2020) erwartet wird. Der Einbezug eines lokalen EVUs bedeutet allerdings, dass die Wertschöpfung vor Ort in der Bergregion verbleibt.

Für die **Investitionsrechnung der Treibstoffkosten/ Ladeinfrastrukturkosten** werden folgende Informationen benötigt:

- Geplante Gesamtanzahl und Beschaffungsplan batterieelektrischer Busse nach Depot- und Streckenladern
- Kosten für Ladestecker, Pantographen, Power Units, Kabelverbindungen, Netzanschluss und Lademanagementsystem
- Kosten für Planung, Projektierung, Bau, Betrieb und Unterhalt
- Abschreibungsdauern von Ladesteckern, Pantographen, Power Units, Kabelverbindungen und Lademanagementsystem
- Jährlicher Durchschnittsverbrauch batterieelektrischer Busse, je Gefässgrösse (entsprechend der berechneten Verbräuche aus der Flottenmodellierung)
- Strom- und Leistungspreise
- Dieselpreise

Mit der geplanten Gesamtanzahl batterieelektrischer Busse, aufgeschlüsselt in Depot- und Streckenlader, kann die nötige Lade- und Netzanschlussleistung und der Bedarf an Ladeinfrastruktur abgeschätzt werden, da die typischen Ladeleistungen von CCS-Steckern und Pantographen bekannt sind (siehe Kapitel 3.1). Mit dem Beschaffungsplan batterieelektrischer Busse werden sinnvolle Ausbaustufen der Ladeinfrastruktur parallel zur Beschaffung der Busse definiert. Damit ist das Mengengerüst der dynamischen Investitionsrechnung aufgestellt und wird mit den Kostendaten für die Ladetechnik, die Kosten für Planung bis Unterhalt und die Abschreibungsdauern komplettiert.

Mithilfe der jährlichen Durchschnittsverbräuche der batterieelektrischen Busse, der Anzahl der betriebenen Busse und dem Strompreis, können die Stromkosten für das Laden der batterieelektrischen Busflotte pro Jahr in der dynamischen Investitionsrechnung bestimmt werden. Zusätzlich ist die Besonderheit des Strommarkts zu beachten, dass nicht nur die gelieferte Strommenge (in kWh), sondern auch die genutzte Anschlussleistung (in kW) über sog. Leistungsentgelte in Rechnung gestellt wird. Das zu erwartende Leistungsentgelt lässt sich mit den Leistungspreisen und der angeschlossenen Ladeleistung der Infrastruktur berechnen. Zuletzt kann mit einer entsprechenden Mindestrendite (z.B. 4% für Energieversorger) die Investitionsrechnung durchgeführt werden. Anhand der umfassenden, dynamischen Investitionsrechnung lässt sich zudem berechnen wie hoch die spezifischen Kosten für die Ladeinfrastruktur und den Strombezug pro gefahrenen Kilometer bei batterieelektrischen Bussen (auch im Falle eines Contractings z.B. durch ein EVU) zu budgetieren sind.

### 6.3 Erkenntnisse für ländlich-touristische Bergregionen

Die gesamte Investitionsrechnung zeigt deutlich auf, dass die Elektrifizierung der Busflotte insbesondere in ländlich-touristischen Bergregionen zu erheblichen Mehrkosten gegenüber dem heutigen Einsatz mit Dieselnissen führt. Hauptgründe dafür sind die etwa doppelten Anschaffungskosten der

batterieelektrischen Busse gegenüber Dieselnissen sowie sehr hohe Kosten für Treibstoff bzw. Ladeinfrastruktur.

Die herausfordernde Einsatzumgebung ist dabei der Treiber der sehr hohen Kosten für Treibstoff/Ladeinfrastruktur: Die Tageseinsätze von Bussen sind vom Energiebedarf anspruchsvoller als in der Stadt und die Fahrzeugausnutzung vollends maximiert. Zusätzlich sind Liniennetze in Bergregionen im Vergleich zu städtischen Liniennetzen radialer aufgebaut, d.h. dass Linien von einem zentralen Punkt in die Aussengebiete geführt sind und wenige Überlappungen in ihren Haltestellen aufweisen (Abbildung 14). Als Folge daraus benötigen zahlreiche Tageseinsätze neben Depotladestationen auch Streckenlader.

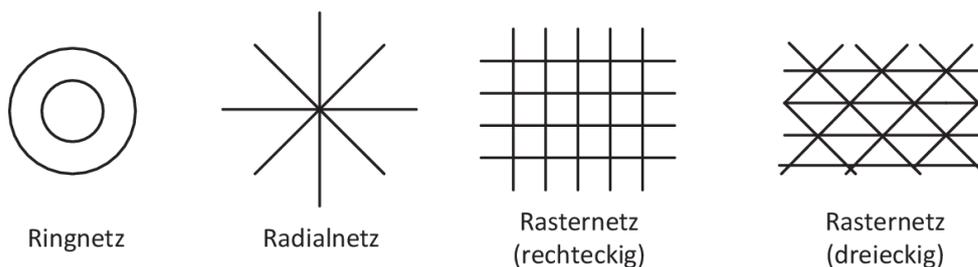


Abbildung 14: Strukturen von Liniennetzen (Quelle: Schnieder L. (2018) Netzplanung. In: Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr. VDI-Buch. Springer Vieweg)

Streckenlader weisen hohe Investitionskosten pro Pantographen (etwa 600 bis 800 t CHF) auf und verursachen durch ihre hohen Anschlussleistungen signifikante Leistungsentgelte. Letztere können in Summe – sofern die Anzahl der Pantographen nicht optimiert wird – durchaus das Doppelte der Stromkosten ausmachen. Insbesondere bei kleinen, weitläufigen Busflotten, wie sie in ländlich-touristischen Bergregionen häufig vorkommen, fallen die Infrastrukturkosten für Streckenlader stark zu Buche, da die Streckenlader in diesem Fall nur von wenigen Bussen und selten genutzt werden. Allerdings sollte bei der Ladeinfrastruktur berücksichtigt werden, dass in den Investitionskosten einmalige Projektierungskosten und Netzanschlusskosten enthalten sind, die einmalig anfallen. Im Vergleich dazu sind Tankinfrastrukturen von Dieselnissen bereits lange beschrieben. Daher sind die Einmalkosten in der Diskussion einer Flottenumstellung gesondert zu behandeln, um das bereits vorhandene Dieselsystem nicht übermässig zu bevorteilen.

#### **Anzahl Streckenlader minimieren**

Daraus folgt, dass bei der Planung von Streckenladern darauf zu achten ist, dass ihre Anzahl geringgehalten und eine hohe Auslastung pro Pantographen erreicht wird. Dadurch können die Kosten gleichmässiger auf die gesamte Fahrzeugflotte verteilt werden. Wir empfehlen gemäss der Fallstudie ein Verhältnis von 1:4 zwischen Streckenladern und Fahrzeugen nicht zu überschreiten, um die Kosten für Streckenlader im Rahmen zu halten. Die Anzahl an Streckenladern kann geringgehalten werden, indem primär auf Depotlader mit grösseren Batterien gesetzt wird und die notwendigen Pantographen an zentralen Knotenpunkten des jeweiligen Liniennetzes (z.B. Bahnhöfen) aufgestellt werden.

### **Streckenlader gemeinsam nutzen**

Je nach Region ist es ebenfalls in Erwägung zu ziehen, ob Ladeinfrastruktur an Knotenpunkten des öffentlichen Verkehrs von mehreren Busbetreibern gemeinsam geplant, installiert und genutzt werden kann. So kann etwa eine Koordination von lokalen Busbetreibern mit überregionalen Busbetreibern (z.B. PostAuto) zu einer Aufteilung der Kosten für die Ladeinfrastruktur führen und die Auslastung der Ladeinfrastruktur verbessern. Bei gemeinsam genutzter Ladeinfrastruktur ist es wichtig, dass Fahrpläne und Umläufe planerisch zwischen den Busbetreibern abgestimmt werden, da die Ladestationen nur durch jeweils ein Fahrzeug zum Laden belegt werden können. Zugleich dürfen Ladestationen nicht mit wartenden Fahrzeugen blockiert werden und Ladungen sollten möglichst rasch abgeschlossen werden.

### **Leistungsspitzen reduzieren**

Eine weitere Massnahme ist es die Leistungsspitzen der Pantographen zu reduzieren, in dem insgesamt weniger Ladeleistung vorgesehen wird oder ein zusätzlicher Batteriespeicher beim Pantographen eingesetzt wird zur Glättung der Leistungsspitzen. Die Batterie wird in dem Fall mit geringer Leistung gleichmässig geladen und speist den Pantographen dann mit voller Leistung während eines Ladevorgangs. Dadurch können kostspielige Leistungsspitzen und teure Netzentgelte vermieden werden. Weiter sollten Anpassungen der Busumläufe und Wartezeiten zu Gunsten von elektrischem Laden und Pantographen-Auslastung in Betracht gezogen werden, da hier ein grosser Hebel für Kosteneinsparungen besteht.

## 7. Handlungsempfehlungen

Die vorliegende Studie zeigt, dass die Elektrifizierung von Linienbussen in ländlich-touristischen Bergregionen technisch möglich, ökologisch äusserst vorteilhaft, aber wirtschaftlich herausfordernd ist. Im Vergleich zur Situation in Städten und Agglomerationen sind die Herausforderungen technisch grösser (kleinere Flotten, höhere Auslastungsschwankungen, grössere topographische und klimatische Einflüsse) und wirtschaftlich teurer (schlechteres Verhältnis von benötigter Infrastruktur zur erbrachten Fahrleistung).

Die technische Bewertung hat gezeigt, dass eine 100% Elektrifizierung möglich ist, während vor allem in der Anfangsphase unbedingt Zusatzheizungen genutzt werden sollten, um die Elektrifizierung zu vereinfachen. Die ökologische Bewertung hat gezeigt, dass – ausgehend von einem 1:1-Busersatz – batterieelektrische Busantriebe gegenüber Dieselbussen die gesamten Umweltauswirkungen im Mittel um etwa 75 % und die Treibhausgasemissionen um etwa 85 % reduzieren können. Mit einer Zusatzheizung mit (Bio-) Diesel, liegen die Reduktionen der Treibhausgasemissionen immer noch bei 70 %. Die wirtschaftliche Bewertung hat ergeben, dass die Mehrkosten für Fahrzeuge bei einem 1:1 Ersatz bei etwa dem Doppelten liegen und zudem erhebliche Kosten bei der Ladeinfrastruktur entstehen. Die Mehrkosten stellen eine erhebliche Barriere für den Wechsel auf batterieelektrische Busse dar. Eine finanzielle Unterstützung, insbesondere im Bereich der Ladeinfrastruktur, könnte dieses Hemmnis deutlich abbauen.

Bei der Ladeinfrastruktur benötigen ländlich-touristische Bergregionen im Verhältnis zu ihren Busflotten überdurchschnittlich viele Streckenlader. Durch die grosse Anzahl an Streckenladern fallen folglich hohe Investitionskosten an, während die hohen Ladeleistungen hohe Leistungsentgelte auslösen. Es ist deshalb ernsthaft zu prüfen, nur jenen Teil der Flotte auf Streckenlader umzustellen, für welchen die benötigte (möglichste zentrale) Ladeinfrastruktur genügend ausgelastet werden könnte.

Für periphere Buslinien mit niedrigem Fahrplantakt, bei denen Ladeinfrastruktur entlang der Strecke nur wenig ausgelastet würde und deshalb kaum amortisierbar wäre, ist längerfristig der Einsatz von Brennstoffzellenbussen zu prüfen, obwohl diese höhere Grünstromkosten aufweisen würden. Gleichzeitig könnte sich in den nächsten 10 bis 15 Jahren zeigen, ob die technologischen Fortschritte bei den Batteriebusen höher sind, als heute angenommen werden darf. Deshalb sollte der technologische Entscheid, ob man den schwierigsten Anteil des Busangebots längerfristig mit Brennstoffzellenbussen oder batterieelektrischen Bussen betreiben wird, möglichst erst in 10 bis 15 Jahren auf Grundlage der dann vorhandenen Technologie beurteilt werden. Hier unterscheidet sich die Situation in ländlich-touristischen Bergregionen von jener in Städten und Agglomerationen, wo heute bereits beurteilt werden kann, welche Antriebstechnologien und welche Ladeinfrastruktur eingesetzt werden können, um Busflotten zu 100 % zu elektrifizieren.

Für eine Elektrifizierung von Busflotten in ländlich-touristischen Bergregionen empfehlen wir folgende Schritte:

### **1) Zusatzheizungen in Fahrzeugen einsetzen**

Zusatzheizungen ermöglichen und erleichtern die Elektrifizierung von Busumläufen, während aus der Gesamtsicht der Busse weiterhin hohe Treibhausgaseinsparungen realisiert werden können. Zusätzlich reduzieren Sie den Bedarf an Streckenladern.

### **2) Anzahl an Streckenladern durch systemische Anpassungen reduzieren**

Streckenlader sind für die Elektrifizierung in ländlich-touristischen Bergregionen notwendig. Allerdings erschweren ihre hohen Kosten die Finanzierung einer Flottenumstellung. Daher sollte ihre Kosten soweit, wie möglich reduziert werden, indem einerseits wenige, zentrale Ladeplätze mit hoher Frequentierung durch mehrere Linien bestimmt werden und andererseits systemische Anpassungen, wie längeren Wartezeiten an Endhaltestellen, Zwischenstopps im Depot, Änderungen der Umlaufzusammensetzung oder Aufteilungen der Umläufe vorgesehen werden (vgl. Abbildung 5). Die Leistungsentgelte infolge Leistungsspitzen können durch den Einsatz dezentraler Batterien beim Pantographen reduziert werden.

### **3) Etappierte Flottenelektrifizierung entsprechend der zumutbaren Mehrkosten**

Einer Vollelektrifizierung stehen hohe Kosten gegenüber. Wenn die Finanzierung der Mehrkosten einer Vollelektrifizierung nicht zumutbar ist, sollte eine Elektrifizierung in Etappen in Erwägung gezogen werden. Selbst bei einer herausfordernden Einsatzumgebung wie ländlich-touristische Bergregionen lassen sich ein Drittel der Busflotte mit Depotladern, ohne Streckenlader und ohne erhebliche Mehrkosten für die Ladeinfrastruktur elektrifizieren. Die restliche Flotte kann zwischenzeitlich durch (Plug-in-)Hybridbusse ersetzt werden, während die technische und preisliche Entwicklung von Wasserstoffbussen und batterieelektrischen Bussen in den kommenden 10 bis 15 Jahren beobachtet werden sollte. Hier können sich neue Optionen für Treibhausgasreduktionen bei der Busflotte auftun. Selbst ein erster Teilersatz der Dieselflote mit Depotladern führt zu deutlichen Treibhausgaseinsparungen.

Die Elektrifizierung von Bussen in ländlich-touristischen Bergregionen ist eine grosse Herausforderung, die aber technisch machbar ist. Bei der Erarbeitung einer Elektrifizierungsstrategie ist wichtig, dass die Analyse iterativ erfolgt. Es gilt frühzeitig die technischen Lösungen und die dazugehörigen Investitionsrechnungen zu kennen, um zwischen technischer Umsetzbarkeit und Kosten abzuwägen. Bereits in einem frühen Stadium sollten alle Projektbeteiligten eine Vorstellung von den zu erwartenden Mehrkosten und den Kostentreibern haben, um diese gegenüber dem ökologischen Mehrwert abwägen zu können.

## Abkürzungsverzeichnis

BAV	Bundesamt für Verkehr
CCS	Combined Charging System (Internationaler Ladestandard)
C-Rate	Charging Rate (Laderate)
EoL	End of life (Lebensende der Batterie)
ESöV	Energiestrategie öffentlicher Verkehr
EVU	Energieversorgungsunternehmen
KTU	Kommunales Transportunternehmen
LCA	Life cycle assessment (Lebenszyklusanalyse)
ÖV	Öffentlicher Verkehr
SORT	Standardised On-Road Test Cycles (Standardisierter Fahrzyklus für Verbrauchsmessungen bei Linienbussen)
TU	Transportunternehmen

## Literaturverzeichnis

- Engadin Bus, St. Moritz Energie, EBP. (2020). Fallstudie Oberengadin: Elektrifizierung von Bussen in ländlichen Bergregionen. BAV E-SöV-Projekt 196.
- Horsky M., Robert-Nicoud T., Barbey-Horvath J., Delacrétar Y., Bossoney L. (2018). Stratégie Energétique 2050 dans les Transports Publics - Etude du potentiel des systèmes de propulsion alternatifs pour bus. BAV ESöV-Projekt 113.
- Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J.N., Elshout P.M.F., Stam G., Verones F., Vieira M.D.M., Hollander A., Van Zelm R. (2016). ReCiPe2016: A harmo-nized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. International Journal of LCA. DOI 10.1007/s11367-016-1246-y.
- Kunith A.W. (2017). Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs - Technologiebewertung für den kosteneffizienten Betrieb emissionsfreier Bussysteme. Springer Verlag. Berlin. ISBN 978-3-658-19346-1. DOI 10.1007/978-3-658-19347-8.
- VCDB VerkehrsConsult Dresden-Berlin (2019). Leitfaden Flottenelektrifizierung für Busbetriebe. Im Auftrag der Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS) und Busbetrieb Solothurn und Umgebung (BSU). BAV ESöV-Projekt 144.