



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

Fallstudie Oberengadin



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 das Internet
www.bav.admin.ch/energie2050

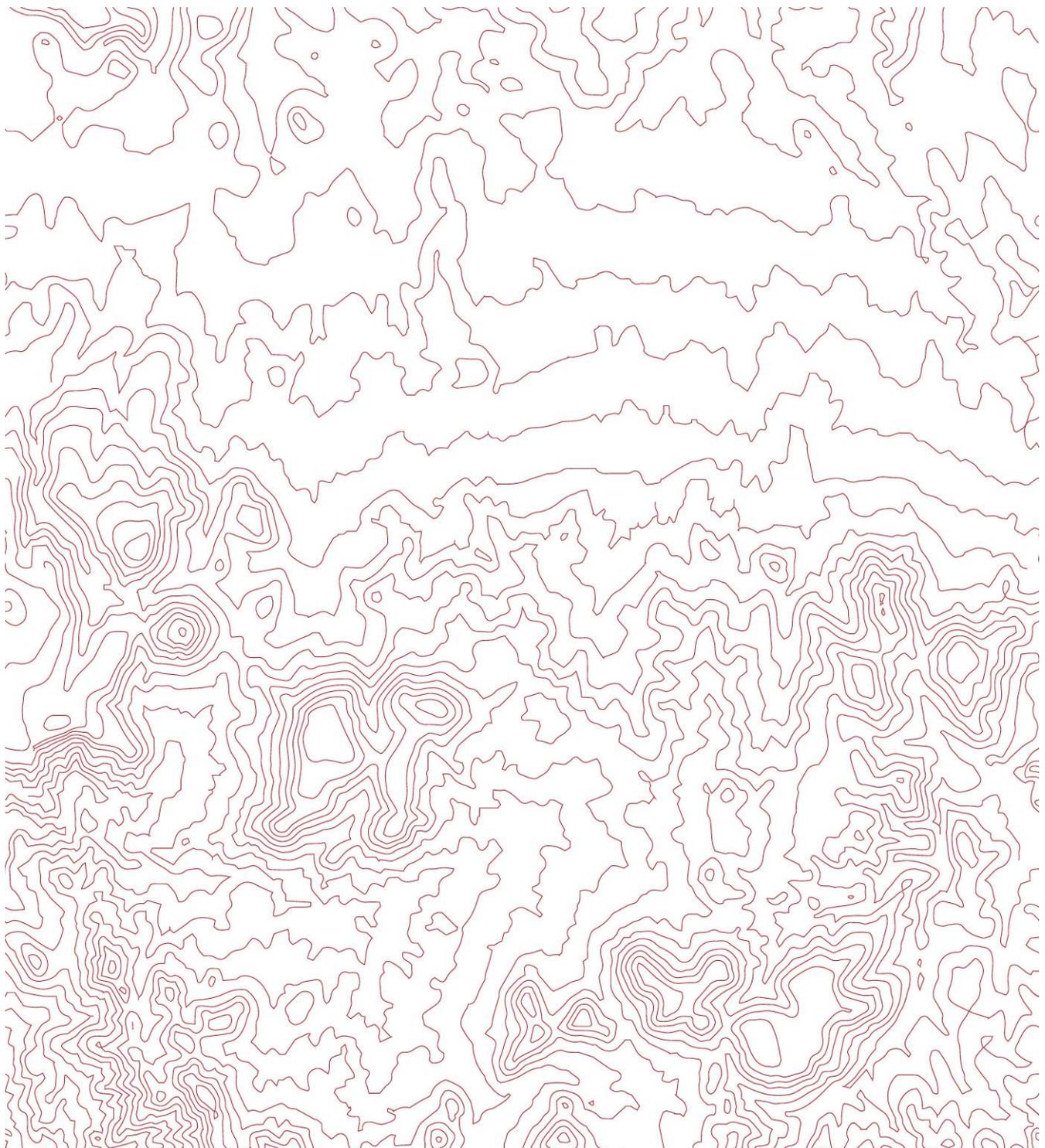
Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor oder sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 09.11.2020

Fallstudie Oberengadin

Elektrifizierung von Bussen in ländlichen Bergregionen
(ESöV P-196)

09.11.2020



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

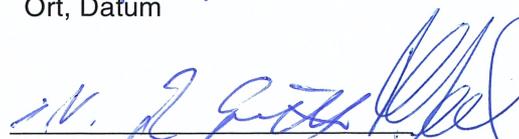
Bei Rückfragen wenden Sie sich gerne an:

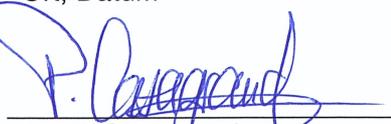
EBP Schweiz AG
Zollikerstrasse 65
8702 Zollikon
Schweiz
Telefon +41 44 395 11 11
info@ebp.ch
www.ebp.ch

Die Auftraggeber geben ihr Einverständnis für die Inhalte der vorliegenden Fallstudie.

Claus, 24. 11. 2020
Ort, Datum

St. Moritz 11. Nov. 2020
Ort, Datum


Ralf Kollegger
Engadin Bus
Unternehmensleiter


Patrik Casagrande
Geschäftsführer
St. Moritz Energie

Zusammenfassung

Die Gemeinde St. Moritz legte im Jahr 2019 einen «Masterplan Elektromobilität» vor, um eine Pionierrolle in der Elektromobilität einzunehmen. Im Masterplan wurde die Vision «100 % Elektrifizierung Busse im Oberengadin» formuliert, die für die Bergregion eine Herausforderung darstellt.

Die vorliegende Fallstudie Oberengadin zeigt, dass eine 100 %-Elektrifizierung der Linienbusse von Engadin Bus technisch möglich, ökologisch äusserst vorteilhaft, aber wirtschaftlich herausfordernd ist. Zur Ermöglichung einer 100 %-Elektrifizierung sollten folgende Massnahmen ergriffen werden:

- Späte Beschaffung der batterieelektrischen Busse
- Zusatzheizungen in Fahrzeugen einsetzen
- Anzahl der nötigen Streckenlader durch systemische Anpassungen reduzieren
- Energieversorger als Komplettanbieter der Ladeinfrastruktur einbeziehen

Es käme zu Kosten in der Höhe von rund 16.1 Mio. Fr. für batterieelektrische Fahrzeuge im Vergleich zu rund 8 Mio. Fr. bei Dieseln. Das elektrische Laden würde etwa 200 bis 300 % mehr kosten als die herkömmliche Betankung mit Diesel (unter Berücksichtigung der hohen Kosten der Ladeinfrastruktur im Depot und auf der Strecke, verteilt über die Lebensdauer). Aus wirtschaftlicher Sicht ist eine 100 %-Elektrifizierung nur mit einer Übernahme der Mehrkosten der Fahrzeuge und einer hohen Förderung der Ladeinfrastruktur möglich ist.

Deshalb empfiehlt es sich zur Vermeidung der hohen Kosten von Streckenladern eine Teilelektrifizierung der Busflotte von Engadin Bus vorzunehmen, bei welcher 30 % der Flotte mit Depotlader-Bussen ersetzt werden können und die restliche Flotte durch (Plug-in-)Hybridbusse laufend zu ersetzt wird. Zugleich sollte die Entwicklung von batterieelektrischen und Brennstoffzellen-Bussen weiterverfolgt werden, um zu identifizieren, wenn neue umweltfreundliche und wirtschaftlich tragbare Technologieoptionen für die restliche Flotte bestehen. Eine Teilelektrifizierung würde Kosten in der Höhe von rund 4.6 Mio. Fr. für batterieelektrische Fahrzeuge im Vergleich zu rund 2.3 Mio. Fr. bei Dieseln verursachen. Aufgrund der günstigeren Depotladeinfrastruktur wären lediglich rund 90% Mehrkosten gegenüber heutigen Dieseln zu erwarten.

Selbst bei einer Teilelektrifizierung kommt es zu bedeutenden ökologischen Verbesserungen mit Reduktionen der gesamten Umweltauswirkungen von etwa 35 % und der Treibhausgasemissionen von etwa 45 %.

Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangslage und Zielsetzung im Oberengadin	5
2.	Technische Bewertung: Flottenmodellierung für batterieelektrische Busse	6
2.1	Einsatzsituation und Datengrundlage	6
2.2	Analysierte Szenarien	7
2.3	Ladeinfrastruktur Streckenlader und Flottenzusammensetzung	8
3.	Ökologische Bewertung: Lebenszyklusanalyse für Oberengadin	12
3.1	Dimensionen und Parameter im Oberengadin	12
3.2	Ergebnisse für das Oberengadin	14
4.	Wirtschaftliche Bewertung: Beschaffungsplan und Investitionsrechnung	21
4.1	Beschaffungsplan und Investitionsrechnung der Busse	21
4.2	Beschaffung der Ladeinfrastruktur	24
4.3	Kapitalwertrechnung der Ladeinfrastruktur	27
4.4	Investitionsrechnung 100 % Elektrifizierung bis 2035	29
5.	Handlungsempfehlung	32
5.1	Reduktion der Mehrkosten	32
5.2	Teilelektrifizierung der Busflotte von Engadin Bus	34

1. Ausgangslage und Zielsetzung im Oberengadin

Mit dem international renommierten, regionalen Zentrum St. Moritz ist das Oberengadin vor allem für ihren Wintertourismus bekannt, während der Tourismus im Sommer stetig an Bedeutung gewinnt.

Im Jahr 2019 legte die Gemeinde St. Moritz einen «Masterplan Elektromobilität» vor, um eine Pionierrolle in der Elektromobilität einzunehmen. St. Moritz will wichtige Rahmenbedingungen für Elektromobilität setzen und Elektromobilität als Beitrag zur Energiewende vorantreiben. Ziel ist dabei neben lokaler Reduktion von Feinstaub- und Lärmbelastung und hoher Sichtbarkeit für die Öffentlichkeit und Gäste aus dem In- und Ausland, die technische Machbarkeit, ökologische Vorteile und Zusatzkosten gegeneinander abzuwägen, um eine ausgewogene Lösung zu finden.

Der Masterplan soll sicherstellen, dass die Elektromobilität in St. Moritz im Rahmen der Energiestrategie des Bundes ein Teil der Lösung ist: Ladelösungen sollen netzverträglich umgesetzt werden, so dass durch sie minimale Netzausbaukosten entstehen und sie die Netzintegration von erneuerbaren Energien erleichtern (z.B. durch Smart Charging und strategische Standortwahl).

Als ein Schwerpunkt des Masterplans Elektromobilität wurden Elektrobusse identifiziert und die Vision «100 % Elektrifizierung Busse im Oberengadin» formuliert. Als Konkretisierung der Vision sieht der Masterplan Elektromobilität die Erarbeitung eines Gesamtkonzepts vor. Als Bereitsteller des öffentlichen Busverkehrs sind vor allem die regionalen Busunternehmen Engadin Bus und Ortsbus St. Moritz im Oberengadin tätig, ergänzt durch überregionale Linien der PostAuto AG.

Die Einführung von batterieelektrischen Bussen ist für das Oberengadin eine Herausforderung. Steigungen im Berggebiet sowie hohe Heizbedarfe im Winter und Klimatisierung im Sommer sorgen für einen hohen Energiebedarf bei batterieelektrischen Bussen und benötigen entsprechend grosse Batterien. Gleichzeitig führt die Saisonalität durch Winter- und Sommertourismus zu einer variierenden Auslastung der Busse und der Menge an nötigen Fahrzeugen.

Die vorliegende Fallstudie Oberengadin klärt deshalb die technischen und betrieblich-organisatorischen Optionen für eine 100 %-Elektrifizierung von Bussen ab und zeigt auf, ob und wie sich diese Vision mit batterieelektrischen Bussen umsetzen lässt.

Der vorliegende Bericht der Fallstudie folgt der Methodik, die im Schlussbericht des Projekts «Elektrifizierung von Bussen in ländlichen Bergregionen» (ESöV P-196) beschrieben wird und lehnt sich in seiner Kapitelstruktur an diesen an.

2. Technische Bewertung: Flottenmodellierung für batterieelektrische Busse

Mit der Vision einer 100 %-Elektrifizierung wurde eine Flottenmodellierung für den Busbetrieb von Engadin Bus durchgeführt und dabei die Unterscheidung nach Tageseinsätzen gemacht, die sich mit Depotladern (D), Streckenladern (S) oder nur schwer (H) elektrifizieren lassen. Aufgrund des durchschnittlich konstanten Fahrgastaufkommens im Oberengadin während der vergangenen Jahre (gemäss Fahrgastzählungen 2011 bis 2019), wird davon ausgegangen, dass die Flottengrösse bis 2035 von ihrer Beförderungskapazität und ihrer Gefässzusammenstellung mit einem Midibus, 12 Standardbussen und sieben Gelenkbussen gleichbleibt.

2.1 Einsatzsituation und Datengrundlage

Für die Flottenmodellierung wurde die potenziell intensivste Einsatzsituation der Busse definiert, um sicherzustellen, dass ein Busbetrieb das ganze Jahr möglich ist:

- Saison: Winter
- Klimatisierung mit vollelektrischer Konvektionsheizung
- Maximale Passagierzuladung, um Pistenschluss in der Skisaison widerzuspiegeln
- Ländlicher Betrieb entsprechend SORT¹ 3 Fahrzyklus (längere Fahrtabschnitte, erhöhte Endgeschwindigkeiten)

Das Liniennetz von Engadin Bus wurde mit Hilfe folgender Datengrundlagen abgebildet:

- Haltestellenangaben des BAV (DIDOK-Liste)
- Linien-/ Haltestellenpläne der sieben Buslinien: Nr. 1, 2, 4, 6, 7, 9 und 10
- Umlaufpläne von 30 Umläufen für alle Wochentage in der Wintersaison: Nr. 31-33 (Ortsbus), 51-58, 94-98, 81-87

Die technischen Parameter wurden in der Modellierung zur Beschreibung des Ladevorgangs und der Batteriegrösse entsprechend Tabelle 1 gewählt. Dabei wurden die Parameter für die Jahre 2020 und für 2035 unterschiedlich gewählt, um den technischen Fortschritt abzubilden und das Zieljahr 2035 einer möglichen Flottenumstellung bzgl. technischer Machbarkeit abklären zu können.

Für die Ladeinfrastruktur wurde angenommen, dass an jedem Endpunkt einer Buslinie ein Streckenlader/ Opportunity Charger aufgestellt wird (d.h. zwei Streckenlader pro Linie), sofern eine Nachladung mit Streckenlader nötig ist. Im Basisszenario (siehe unten) werden so 20 Streckenlader benötigt.

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

Parameter	Wert	Einheit
Ladeleistung CCS (2020)	150	kW
Ladeleistung CCS (2035)	150	kW
Ladeleistung Pantograph (2020)	300	kW
Ladeleistung Pantograph (2035)	600	kW
Mindestwartezeit zur Verbindung mit Pantograph (Ramp-up and -down)	1	min
C-Rate (2020)	1.2	-
C-Rate (2035)	2.5	-
Ladeeffizienz der Batterie	90	%
Maximale Entladetiefe [Depth-of-Discharge (DoD)] (2020)	60	%
Maximale Entladetiefe [Depth-of-Discharge (DoD)] (2035)	80	%
Batteriegrösse Standardbus (2020)	288	kWh
Batteriegrösse Standardbus (2035)	450	kWh
Batteriegrösse Gelenkbus (2020)	300	kWh
Batteriegrösse Gelenkbus (2035)	650	kWh

Tabelle 1: Ladeparameter und Batteriegrößen der Flottenmodellierung

2.2 Analyisierte Szenarien

Insgesamt wurden vier Szenarien für eine batterieelektrische Busflotte analysiert:

- **Basisszenario:** Analyse einer Busflotte mit Depotladern und 20 Streckenladern (Opportunity Chargers) an Endhaltestellen
- **Alternativszenario:** Wie das Basiszenario, nur mit 13 Streckenladern
- **Optimiertes Szenario 1:** Basisszenario + Zusatzheizsystem mit (Bio-) Diesel oder Bioethanol
- **Optimiertes Szenario 2:** Basisszenario + Zusätzliche Wartezeit von +20% an Endhaltestellen zum Streckenladen

Während das Basisszenario die Ausgangslage der Analyse bildet, wurde im Alternativszenario eine vertiefte Analyse der möglichen Haltestellen für Streckenlader (Opportunity Chargers) durchgeführt, um wenige, aber zuverlässige Ladehalte zu definieren. Da Streckenlader teuer sind, sollte ihre Anzahl so gering wie möglich gehalten werden. Aus dem Basisszenario konnte bereits abgeschätzt werden, dass es aus wirtschaftlicher Sicht überproportional teuer sein würde, wenn die Anzahl an Streckenladern der Grösse der Busflotte von Engadin Bus entspräche (20 Busse).

Die optimierten Szenarien 1 und 2 wurden gemeinsam mit Engadin Bus so definiert, dass die separaten Effekte einer Zusatzheizung und zusätzlicher Wartezeit an Endhaltestellen aufgezeigt werden können.

2.3 Ladeinfrastruktur Streckenlader und Flottenzusammensetzung

Bei der Analyse des Alternativszenarios lag der Fokus der Flottenmodellierung darauf abzuklären, ob diese die gleiche Flottenelektrifizierung, wie das Basisszenario bewirken kann. Die Analyse musste durchgeführt werden, da das Laden in diesem Szenario auf mehrere Haltestellen entlang der Strecke rechnerisch aufgeteilt wurde (Tabelle 3) und es somit mehr Zeitbedarf für Ramp-Ups und -Downs der Pantographen zu berücksichtigen galt.

Die Ladehaltestellen für Streckenlader für das Alternativszenario wurden entsprechend folgender Kriterien ausgewählt:

- Jede Haltestelle – nicht nur Endhaltestellen – kommt als Ladehaltestelle in Frage, wenn sie eine Haltebucht besitzt, um den Verkehrsfluss beim Laden nicht zu beeinträchtigen. Endhaltestellen werden grundsätzlich so betrachtet, dass sie den Verkehrsfluss nicht negativ beeinflussen können und deshalb keine Haltebucht benötigen.
- Haltestellen, die von vielen verschiedenen Linien angefahren werden, werden bevorzugt.
- Haltestellen mit hoher Frequentierung pro Halteplatz werden bevorzugt.
- Es ist davon auszugehen, dass die Haltestellen langfristig bestehen bleiben, um die Ladeinfrastruktur mindestens 15 bis 20 Jahre erhalten zu können.
- Pro Linie sind mindestens 3 Haltestellen vorhanden, auf denen geladen werden kann, um Redundanz zu schaffen. Gleichzeitig sollte verhindert werden, dass es zu Ladeausfällen kommt, falls zwei Linien am gleichen Streckenlader laden wollen.
- Es wird ein Streckenlader pro Richtung installiert, sofern es sich nicht um eine Endhaltestelle handelt. Dort wird nur ein Streckenlader vorgesehen.

Insgesamt wurden 8 geeignete Ladehaltestellen identifiziert, die mit insgesamt 13 Streckenladern potenziell auszustatten wären (Tabelle 2):

Geeignete Ladehaltestelle	Nötige Anzahl Streckenlader	Zuständiger Verteilnetzbetreiber
Chamues-ch, plaz	1	Repower
Cinuos-chel-Brail, staziun	1	Repower
Maloja, Posta	1	Azienda Elettrica Bregaglia
Samedan, Bahnhof	2	EW Samedan
Silvaplana, Kreisel Mitte	2	Repower
St. Moritz Bad, Via San Gian	2	St. Moritz Energie

St. Moritz, Bahnhof	2	St. Moritz Energie
St. Moritz, Schulhausplatz	2	St. Moritz Energie
TOTAL	13	

Tabelle 2: Alternativszenario: Geeignete Ladehaltestelle, nötige Anzahl Streckenlader und zuständiger Verteilnetzbetreiber

Damit wären pro Linie theoretisch folgende Anzahlen an Ladehalten möglich (Tabelle 3):

Liniennummer	Anzahl möglicher Ladehalte
1	5
2	3
4	4
6	4
7	2
9	3
10	6

Tabelle 3: Anzahl möglicher Ladehalte je Linien im Oberengadin

Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigen, wie viele der 30 Wintertageseinsätze von Engadin Bus sich je Szenario im Jahr 2020 und 2035 mit Depotladern, nur mit Streckenladern oder schwer/ nur mit Umstellungen elektrifizieren lassen. Im Jahr 2020 (Abbildung 1) lassen sich nur 1 bis 2 Tageseinsätze mit reinen Depotladern elektrifizieren. Im Basis- und Alternativszenario lassen sich vier Tageseinsätze bereits mit Streckenladern elektrifizieren, während der positive Effekt einer Zusatzheizung deutlich wird. Ist diese verbaut, lassen sich rund die Hälfte der Tageseinsätze mit Streckenladern bewerkstelligen. Insgesamt zählen im Jahr 2020 noch viele Tageseinsätze zur Kategorie «Heavy Duty», so dass im Jahr 2020 maximal 16 von 30 Tageseinsätzen – im Falle einer Zusatzheizung – elektrifiziert werden können.

Im Jahr 2035 (Abbildung 2) lässt sich bereits ein Grossteil der Tageseinsätze elektrifizieren, während Depotlader nur mit Zusatzheizung einen relevanten Teil mit 9 von 30 Tageseinsätzen elektrifizieren können. Bei allen Szenarien lassen sich die meisten Tageseinsätze nur mit Streckenladern elektrifizieren, während nur noch 1 bis 4 Heavy-Duty-Tageseinsätze (je nach Szenario) übrigbleiben. Es zeigt sich ausserdem, dass beim Alternativszenario auf einem Tageseinsatz für das Streckenladen keine ausreichende Ladezeit durch die Aufteilung auf mehrere Ladehaltestellen zur Verfügung steht.

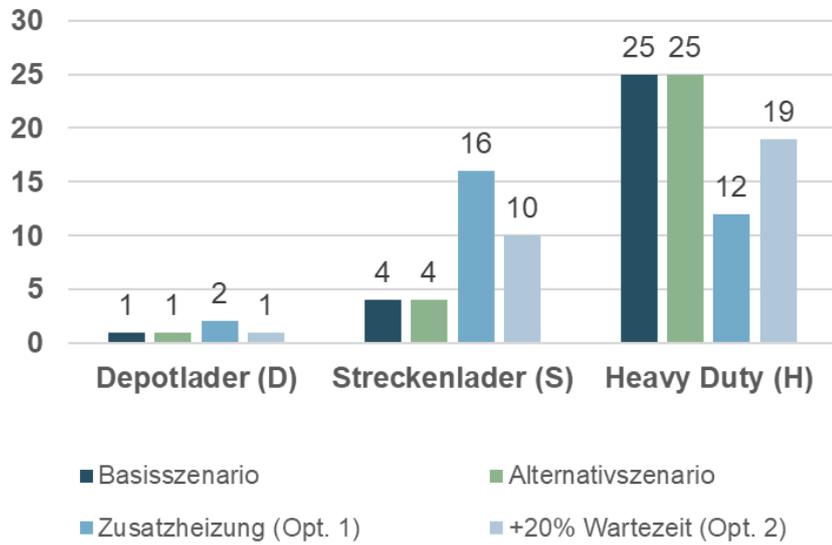


Abbildung 1: Elektrifizierbare Tageseinsätze je Ladekategorie und Szenario (Jahr 2020)

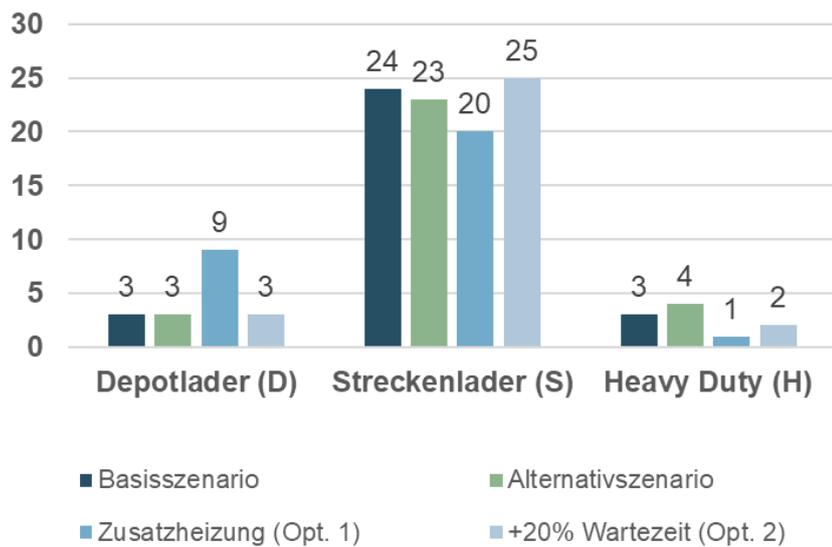


Abbildung 2: Elektrifizierbare Tageseinsätze je Ladekategorie und Szenario (Jahr 2035)

Insgesamt lassen sich folgende Erkenntnisse aus der Flottenmodellierung ableiten:

1) Vollelektrifizierung nur mit Streckenladern möglich

Mit Sicht auf das Zieljahr 2035 ist eine Vollelektrifizierung der Busflotte von Engadin Bus nur mit Streckenladern, Anpassungen der Tageseinsätze oder zusätzlichen Depotladebussen umsetzbar. Eine Teilelektrifizierung mit 9 von 30 Tageseinsätzen ist mit Hilfe von Zusatzheizungen in den Bussen bis 2035 möglich.

2) 13 Streckenlader sind technisch ausreichend

Für eine Elektrifizierung sind Streckenlader an häufig genutzten Haltestellen ausreichend und nicht an jedem Endpunkt der Linien aufzustellen. Je weniger Streckenlader eingesetzt werden können, desto geringer fallen die Investitionskosten für Ladeinfrastruktur aus. Für die Umsetzung von Streckenladern sollte unbedingt vor einer definitiven Einführung abgeklärt werden, wie die Busumläufe so aufeinander abgestimmt werden können, dass an den Ladehaltestellen genug Zeit zum Laden garantiert werden kann und sich die verschiedenen Linien zeitlich nur geringfügig überschneiden.

3) Zusatzheizungen nutzen

Zusatzheizungen mit (Bio-) Diesel oder Bioethanol können einen wichtigen Beitrag zur Elektrifizierung – insbesondere zu einem frühen Zeitpunkt – leisten. In späteren Jahren werden sie nicht mehr zwingend für eine Vollelektrifizierung benötigt, aber erlauben es mehr Tageseinsätze mit Depotladern zu elektrifizieren.

4) Heavy Duty-Tageseinsätze durch Umlaufanpassungen lösen

Für die in 2035 verbleibenden Heavy-Duty-Einsätze sollte über Detailanpassungen bei den Tageseinsätzen/ Umläufen oder die Anschaffung zusätzlicher Busse nachgedacht werden, da diese sonst nur schwer zu elektrifizieren sind. Bei genauerer Untersuchung der betroffenen Tageseinsätze zeigt sich, dass bei ihnen keine oder zu wenig Wartezeiten, die zum Nachladen genutzt werden können, vorgesehen sind.

3. Ökologische Bewertung: Lebenszyklusanalyse für Oberengadin

Zur Überprüfung der ökologischen Konsequenzen eines Wechsels von Dieselsembussen auf batterieelektrische Busse oder anderen alternative Antriebsarten wurde eine Lebenszyklusanalyse mit dem Paul Scherrer Institut entwickelt und mit den Parametern des Busbetriebs im Oberengadin durchgeführt.

3.1 Dimensionen und Parameter im Oberengadin

Folgende **Dimensionen** wurden für den Vergleich der Umweltauswirkungen im Oberengadin betrachtet:

- Antriebsarten:
 - Diesel (als Referenz)
 - Dieselhybrid
 - Wasserstoff-Brennstoffzelle
 - Depotlader mit LFP² Lithium-Ionen-Batterie
 - Streckenlader mit NMC² Lithium-Ionen-Batterie
- Gefässgrößen:
 - 12m Standardbus (SB)
 - 18m Gelenkbus (GB)
- Strommixe zum Laden und zur Wasserstoffelektrolyse:
 - Erneuerbarer Strommix mit den Anteilen 95% Wasserkraft, 5% Solar, Wind und Biomasse
 - Schweizerischer Konsumentenmix mit 65% Stromproduktion in der Schweiz (23% Wasserkraft aus Speicherkraftwerken, 20% Wasserkraft aus Laufwasserkraftwerken, 18% Kernkraft, 2% Kommunale KVA, 2% Holzheizkraftwerke) und 35% ausländische Stromproduktion (15% Französische Wasserkraft, 1% Französische Kernkraft, 19% Produktionsmix im europäischen Stromnetz gemäss Abbildung 3)
- Heizungssysteme im Bus:
 - Standardheizung
 - Zusatzheizung mit Strom, Gas oder Diesel

2 LFP: Fahrzeugbatterie mit Kathode aus Lithiumeisenphosphat, typisch für Depotlader-Busse, NMC = Fahrzeugbatterie mit Kathode aus Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid, typisch für Streckenlader-Busse

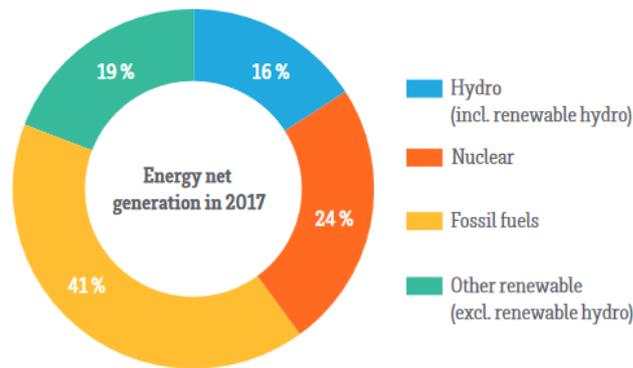


Abbildung 3: Europäischer Strom-Produktionsmix im Jahr 2017 [Quelle: ENTSO-E]

Die folgenden **Parameter** wurden für den Vergleich der Umweltauswirkungen gewählt:

- Annahme der Lebens-/ Betriebsdauer der Linienbusse: 14 Jahre
- Lebensdauer einer Lithium-Ionen-Batterie: 7 Jahre (ein Wechsel pro Fahrzeugleben)
- Jährliche Fahrleistung (entsprechend heutiger Flotte von Engadin Bus):
 - 12m Standardbus: 80'000 km/a
 - 18m Gelenkbus: 60'000 km/a
- Motorleistungen:
 - Diesel: 206 kW (12m SB), 253 kW (18m GB)
 - Elektrisch: 200 kW (12m SB), 400 kW (18m GB)

(gilt für Depotlader, Streckenlader und Wasserstoff-Brennstoffzelle)
- Repräsentative SORT-Fahrzyklus³ des Linienbetriebs: SORT 2
- Durchschnittliche Steigungsklasse des Linienbetriebs: +2% im Mittel
- Leistung des Heizungssystems bei elektrischem Antrieb
 - Standardheizung: 14.6 kW (12m SB), 19.6 kW (18m GB)
 - Zusatzheizung: +15kW = 30kW gesamt (12m SB), +20kW = 40kW gesamt (18m GB)
- Grössen der Fahrzeugbatterien: siehe Tabelle 4
- Produktionsort der Fahrzeugbatterie: China
- Elektrische Rekuperationseffizienz: 50% bei Bergabfahrten

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

Antriebsart	12 m Standardbus	18 m Gelenkbus
Hybrid	19 kWh	30 kWh
Depotlader (LFP-Batterie)	200 kWh	265 kWh
Streckenlader (NMC-Batterie)	150 kWh	200 kWh

Tabelle 4: Angenommene Batteriegrößen nach Antriebsart und Gefässgröße

3.2 Ergebnisse für das Oberengadin

Die Umweltauswirkungen während des Lebenszyklus von Linienbussen wurde im Oberengadin in ihrer Gesamtheit analysiert. Die Ergebnisse sind im Folgenden für 12 m Standardbusse dargestellt. Neben den Gesamtergebnissen sind im Folgenden die zu erwartenden Treibhausgasemissionen und Feinstaubemissionen einzeln aufgezeigt.

Gesamte Umweltauswirkungen

Die gesamten Umweltauswirkungen der Antriebsarten Diesel, Dieselhybrid, Wasserstoff-Brennstoffzelle, Depotlader und Streckenlader sind in Abbildung 4 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. Dieselbussen, wenn im Betrieb der erneuerbare Strommix genutzt wird. Der Unterschied zwischen den drei alternativen Antriebsarten und Dieselbussen fällt geringer aus, wenn man den Strommix verändert, der zum Laden und zur Elektrolyse des Wasserstoffs genutzt wird (Abbildung 5). Aber auch mit dem schweizerischen Konsumentenmix (d.h. durchschnittlicher Strommix, der im Mittel im schweizerischen Stromnetz vorliegt) können die Umweltauswirkungen im Vergleich zum Dieselbus um 59 % bei Brennstoffzellenbussen und um 69 % bei batterieelektrischen Bussen reduziert werden.

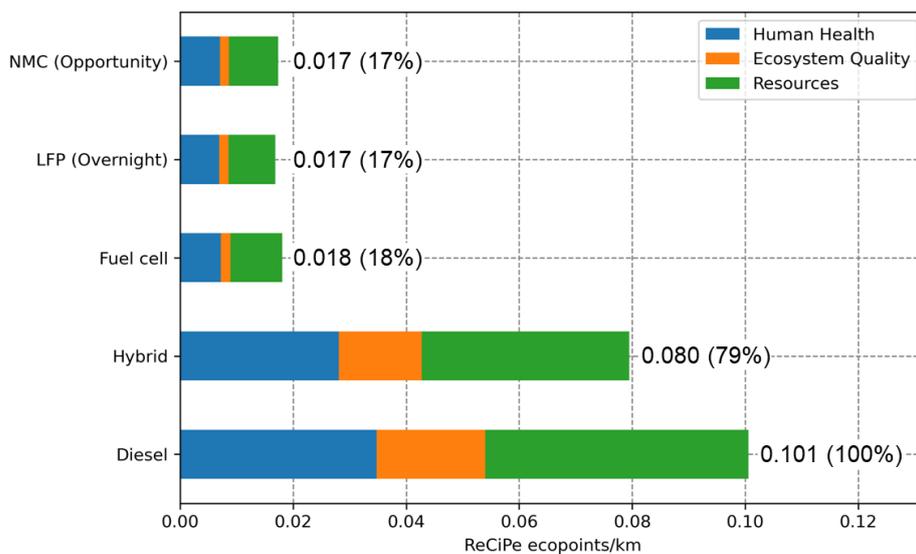


Abbildung 4: Gesamte Umweltauswirkungen über den Lebenszyklus in ReCiPe-Umweltpunkten je Antriebsart, erneuerbarer Strommix (Hierarchische Aggregation nach ReCiPe-Methodik), Hinweis: Angaben in Klammern geben den relativen Wert im Vergleich zum Dieselbus an.

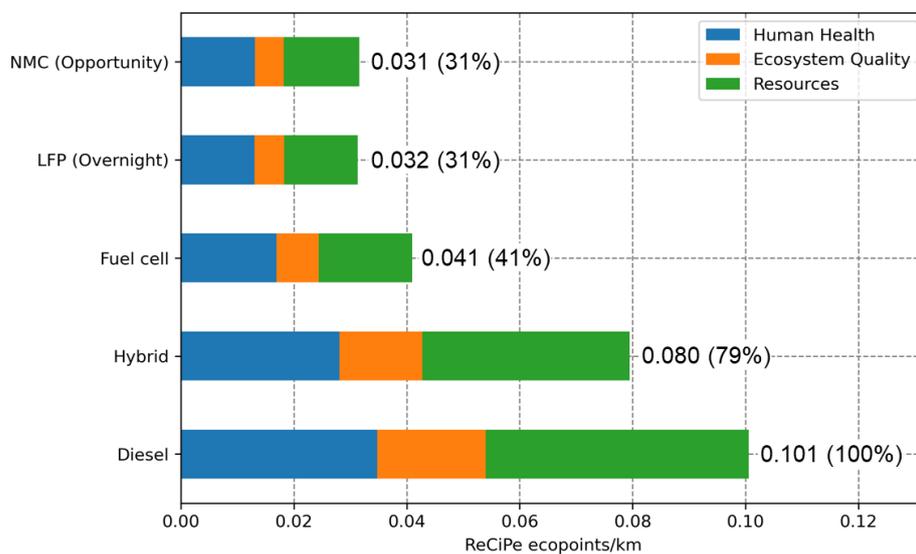


Abbildung 5: Gesamte Umweltauswirkungen über den Lebenszyklus in ReCiPe-Umweltpunkten je Antriebsart, durchschnittlicher schweizerischer Konsumentenstrommix (Hierarchische Aggregation nach ReCiPe-Methodik)

Treibhausgasemissionen

Mit Blick auf die Treibhausgasemissionen sind erhebliche Verbesserungen bei alternativen Antrieben zu beobachten (Abbildung 6 und Abbildung 7). Insgesamt ist im Vergleich der drei alternativen Antriebsarten Wasserstoff-Brennstoffzelle, Depotlader und Streckenlader mit Bussen mit Verbrennungsmotoren (Diesel und Dieselhybrid) deutlich zu sehen, dass ein grosser Anteil der Treibhausgasemissionen aus der direkten Verbrennung (grauer Balkenanteil) stammt und mit elektrischen Antrieben wegfällt. Die Gesamtemissionen der drei alternativen Antriebsarten ist so hoch, wie allein die Produktion (Gewinnung und Raffinierung) des Diesels bei Diesel- und Dieselhybridbussen. Der orangene Balkenanteil zeigt, dass die Batterieproduktion bei batterieelektrischen Bussen trotz einer Ersatzbatterie während der Lebenszeit einen geringen Einfluss auf die Treibhausgasemissionen hat.

Mit Hybridbussen lassen sich gegenüber Dieselbussen 24 % der Emissionen vermeiden, während Brennstoffzellenbusse – abhängig vom Strommix – zwischen 72 bis 92 % Treibhausgase einsparen können. Batterieelektrische Busse können zwischen 80 und 93 % Treibhausgase reduzieren. Die Bandbreite der möglichen Treibhausgasreduktionen bei Brennstoffzellenbussen fällt im Vergleich zu batterieelektrischen Bussen höher aus, da Wasserstoffelektrolyse ein energieintensiver und verlustreicher Prozess ist, dessen Treibhausgas-Fussabdruck sich mit einem CO₂-intensiveren Strommix potenziert verschlechtert.

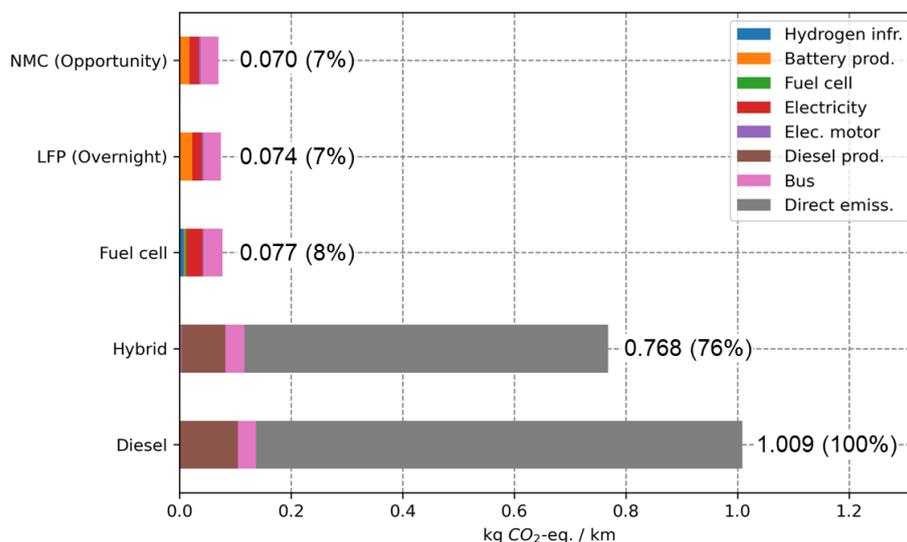


Abbildung 6: Lebenszyklus-Emissionen von Treibhausgasen (in CO₂-Äquivalenten) je Antriebsart, Erneuerbarer Strommix

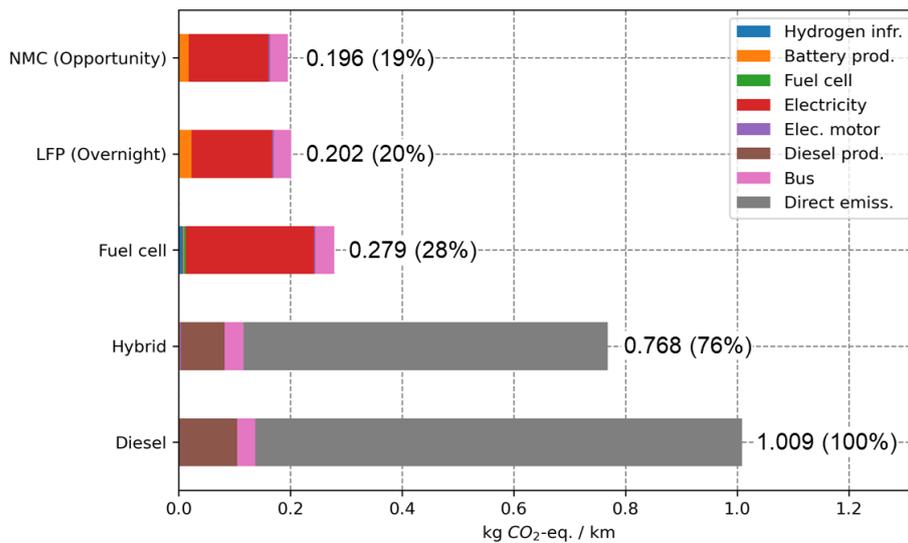


Abbildung 7: Lebenszyklus-Emissionen von Treibhausgasen (in CO₂-Äquivalenten) je Antriebsart, Durchschnittlicher schweizerischer Konsumentenstrommix

Neben den zwei gewählten Strommixen wurde allgemein untersucht, welchen Einfluss die CO₂-Intensität des Strommixes auf die Treibhausgasemissionen der alternativen Busantriebe Wasserstoff-Brennstoffzelle, Depotlader und Streckenlader hat (Abbildung 8). Dabei zeigt sich, dass die zwei gewählten Strommixe (rot umkreist) im Vergleich zum europäischen Strommix zu geringen Treibhausgasemissionen bei den alternativen Busantrieben führen. Bei der Wahl des erneuerbaren Strommixes (linker Kreis) ist die CO₂-Intensität des Strommixes bereits nahe dem möglichen Minimum. Mit diesem Strommix sind die Treibhausgasemissionen der alternativen Busantriebe ebenfalls dem Minimum nahe. Damit können bereits heute bei einem Umstieg auf alternative Busantriebe die Treibhausgasemissionen im höchsten Masse reduziert werden.

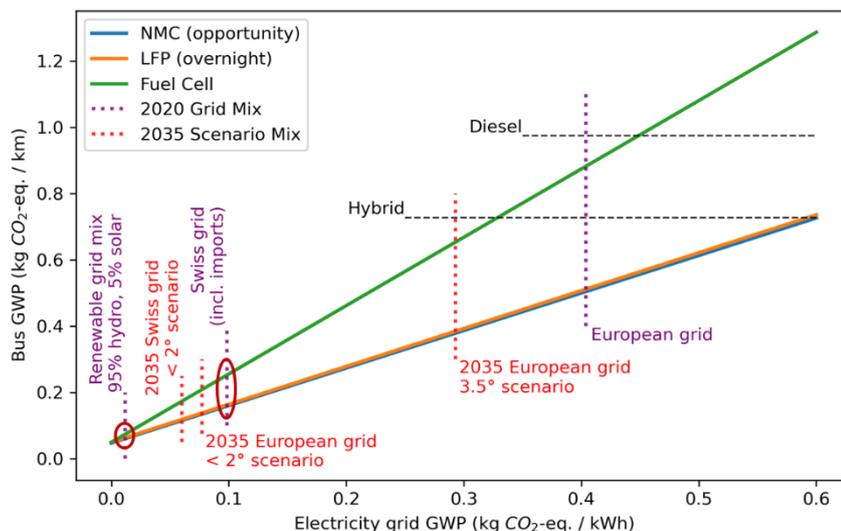


Abbildung 8: Lebenszyklus-Emissionen von Treibhausgasen alternativer Busantriebe, abhängig von der CO₂-Intensität des genutzten Strommixes, Rote Kreise: Gewählte Strommixe der LCA im Oberengadin

Der Einfluss der Benutzung einer Zusatzheizung bei batterieelektrischen Bussen auf die Treibhausgasemissionen ist in Abbildung 9 abgebildet. Bei der Benutzung einer elektrischen Zusatzheizung steigen die Emissionen nur geringfügig an. Wenn Zusatzheizungen mit Gas oder Diesel betrieben werden – der potenziell CO₂-intensivste Betriebsfall – steigen die Treibhausgasemissionen an. Trotz Gas- oder Dieselbetrieb der Zusatzheizung sind allerdings immer noch Reduktionen von Treibhausgasemissionen ggü. Dieselsembussen von etwa 70% (statt etwa 90% in Abbildung 6) 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.

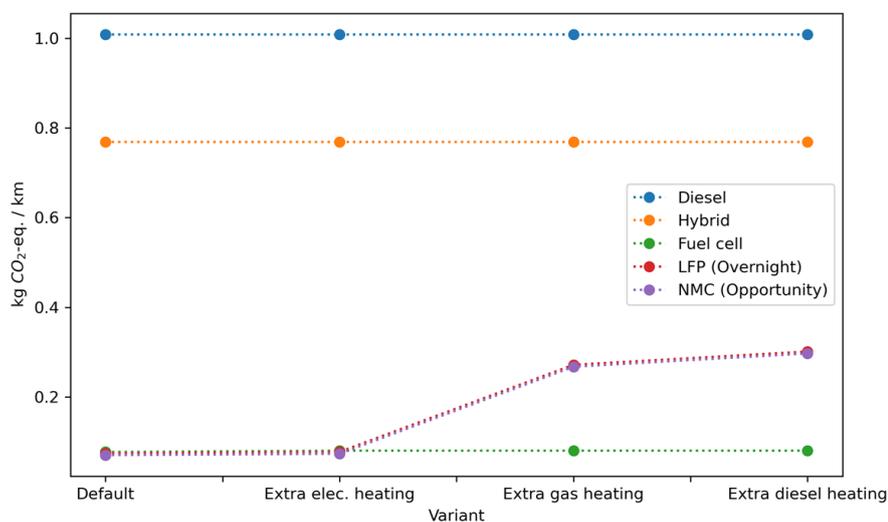


Abbildung 9: Einfluss von Zusatzheizungen in batterieelektrischen Bussen auf die Lebenszyklus-Emissionen von Treibhausgasen (in CO₂-Äquivalenten)

Feinstaubemissionen

Die Feinstaubemissionen über den Lebenszyklus von Linienbussen werden in der Analyse in PM₁₀-Äquivalenten angegeben (Abbildung 10 und Abbildung 11). Damit werden Partikel bis 10 Mikrometern erfasst, die aufgrund ihrer Größe leicht über die Atemwege in den menschlichen Körper gelangen können. Feinstäube führen zu negativen Gesundheitsfolgen, wie Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Krebs- und Atemwegserkrankungen sowie erhöhter Sterblichkeit.

Feinstäube fallen in hohem Masse vor allem bei der Batterie- und Dieselproduktion, der direkten Verbrennung, der nicht-erneuerbaren Stromproduktion und der Produktion des Busses an. Bei der Batterieproduktion fallen Feinstäube insbesondere beim Lithium- und Metallabbau sowie der Metallverhüttung (z.B. Grafit und Kupfer) an. Bei der Dieselproduktion entstehen Feinstäube insbesondere bei der Verbrennung von Flare Gas bei der Rohölproduktion und dem Maschineneinsatz bei der Rohöl-Extraktion. Die direkten Emissionen von Feinstäuben beim Fahrzeugbetrieb entstehen bei

Verbrennungsmotoren durch die Verbrennung von Diesel, aber auch durch Reifen- und Bremsabrieb bei allen Antriebsarten.

Abhängig vom Strommix können batterieelektrische Busse zwischen 33 bis 59 % der Feinstaubemissionen von Dieseln bussen einsparen, während Brennstoffzellenbusse zwischen 17 und 54 % Einsparung bringen. Wie bei den Treibhausgasemissionen, schlägt sich der hohe, verlustreiche Energieaufwand der Wasserstoffelektrolyse bei Brennstoffzellenbussen in ihrer Feinstaubbilanz nieder, da ein CO₂-intensiver Strommix häufig ebenso Feinstaub-intensiv ist (Abbildung 11). Bei Hybridbussen können in einem geringen Masse von 5 % Feinstäube gegenüber Dieseln bussen eingespart werden.

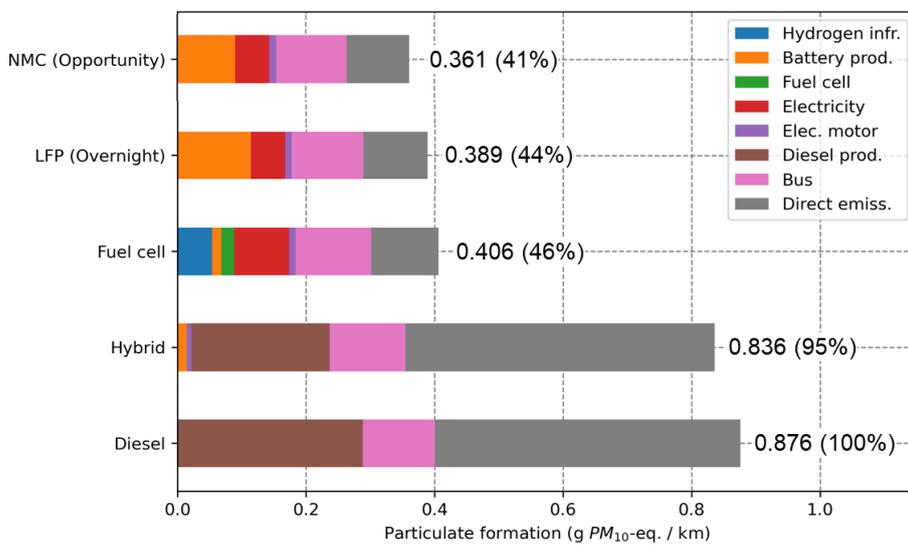


Abbildung 10: Lebenszyklus-Emissionen Feinstäube (in PM₁₀-Äquivalenten) je Antriebsart, erneuerbarer Strommix

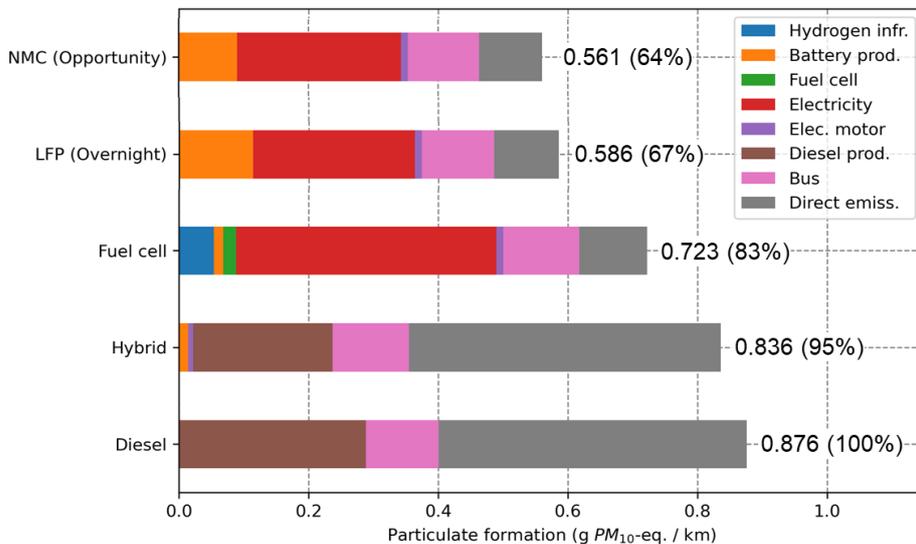


Abbildung 11: Lebenszyklus-Emissionen Feinstäube (in PM₁₀-Äquivalenten) je Antriebsart, durchschnittlicher schweizerischer Konsumentenstrommix

Haupterkenntnisse

Batterieelektrische Busse sind gegenüber Dieseln in der Oberengadin aus Sicht der Umweltauswirkungen äusserst vorteilhaft. Die Wahl eines durchschnittlichen schweizerischen Strommixes schmälert zwar diese Umweltvorteile leicht, aber ändert am Vergleich der Antriebsarten nichts. Die gesamten Umweltauswirkungen von Dieseln lassen sich mit batterieelektrischen Bussen um bis zu 80 % reduzieren. Treibhausgasemissionen lassen sich um bis zu 90 % gegenüber Dieseln reduzieren, während selbst der Einsatz von treibstoffbetriebenen Zusatzheizungen weiterhin 70 % Reduktionen zulässt. Die Emissionen von Feinstäuben sinken beim Einsatz von batterieelektrischen Bussen um bis zu 60 %.

Insgesamt sind batterieelektrische Busse gegenüber Dieseln ökologisch deutlich zu bevorzugen. Mit erneuerbarem Strom geladen, lassen sich bereits im Jahr 2020 batterieelektrische Busse mit maximalen ökologischen Vorteilen nutzen!

4. Wirtschaftliche Bewertung: Beschaffungsplan und Investitionsrechnung

In diesem Kapitel werden die Investitionskosten der batterieelektrischen Fahrzeuge und die Kosten für Ladeinfrastrukturen mit den Anschaffungs- und Treibstoffkosten von herkömmlichen Dieselnbussen verglichen. Der Beschaffungsplan zeigt, die zeitliche Staffelung einer möglichen Umstellung bis 2035. Während bei den Investitionskosten von Bussen eine statische Vergleichsrechnung (Kosten ohne Abzinsung) ausreichend ist, sollte bei den Treibstoff-/ Infrastrukturkosten eine dynamische Vergleichsrechnung (Kosten und Abzinsung über Lebenszeit verteilt) aufgestellt werden.

4.1 Beschaffungsplan und Investitionsrechnung der Busse

Auf Basis der Ergebnisse der Flottenmodellierung (Kapitel 2) und der bereits geplanten Ersatze von Dieselnbussen bei Engadin Bus wurde ein möglicher Beschaffungsplan für Elektrobusse ausgearbeitet.

Der Beschaffungsplan der Elektrobusse orientiert sich an folgenden Annahmen und ist in Tabelle 5 aufgeführt:

- Eine 100%-Umstellung auf Elektrobusse soll bis 2035 vollzogen sein und sich nahtlos in die bestehende Busbeschaffung integrieren
- Die Umstellung soll aufgrund der anspruchsvollen Einsatzbedingungen so spät wie möglich erfolgen
- Die Flottengrösse bleibt konstant (1 Midibus, 12 Standardbusse, 7 Gelenkbusse)
- Der Busersatz erfolgt nach Massgabe von hoher Fahrzeugabnutzung durch Winterbetrieb mit Strassensalzung und Skitouristen.
- Busse haben einen Batterieersatz nach 7 Jahren (jeder Bus braucht zwei Batterien über die Einsatzdauer von 12 Jahren)
- Die Fahrzeugbeschaffung erfolgt proportional zu den elektrifizierbaren Tageseinsätzen der 30 Tageseinsätze aus der Flottenmodellierung (Kapitel 2)
- Midibusse werden batterieelektrisch erhältlich sein oder durch Standardbusse ersetzt
- Ein Gelenkbus wird vorzeitig batterieelektrisch angeschafft, um seine betriebliche Integration auszutesten

Aufgrund der anspruchsvollen Einsatzbedingungen im Oberengadin erfolgt die Elektrifizierung so spät wie möglich. Ab 2024 werden keine neuen Dieselnbusse mehr beschafft.

Den Berechnungen ist die Annahme zugrunde gelegt, dass die ersten zwei batterieelektrischen Standardbusse 2024 angeschafft werden. In der Periode 2025 bis 2029 werden sechs weitere batterieelektrische Standardbusse

beschafft. Zwischen 2030 und 2034 werden nochmals vier Standardbusse angeschafft und 2033 kommt der erste batterieelektrische Gelenkbus frühzeitig zur Flotte hinzu. Im Jahr 2035 werden schliesslich die restlichen sechs batterieelektrischen Gelenkbusse sowie ein batterieelektrischer Midibus beschafft. Mit diesem Beschaffungsplan könnte die Zielstellung 2035 auf Elektrobusbetrieb umgestellt zu haben, eingehalten werden. Im Folgenden wird basierend auf diesen Annahmen weiter gerechnet.

Abbildung 12 zeigt die kumulierte Anzahl an batterieelektrischen Busgefässen entsprechend dem angenommenen Beschaffungsplan. Bis 2028 werden insgesamt acht batterieelektrische Standardbusse beschafft. Ab 2030 sind rund die Hälfte der Busse elektrifiziert. Erst im Jahr 2035 werden die Gelenkbusse elektrifiziert.

Ablösungs-jahr	Elektro Midibus	Elektro Standard-bus	Elektro Gelenkbus	Diesel Midibus	Diesel Standard-bus	Diesel Gelenkbus
2020	0	0	0	0	1	0
2021	0	0	0	0	0	4
2022	0	0	0	0	0	1
2023	0	0	0	1	0	2
2024	0	2	0	0	0	0
2025	0	0	0	0	0	0
2026	0	4	0	0	0	0
2027	0	0	0	0	0	0
2028	0	2	0	0	0	0
2029	0	0	0	0	0	0
2030	0	3	0	0	0	0
2031	0	0	0	0	0	0
2032	0	0	0	0	0	0
2033	0	0	1*	0	0	0
2034	0	1	0	0	0	0
2035	1	0	6**	0	0	0
Total	1	12	7	1	1	7

Tabelle 5: Vorgeslagener Beschaffungsplan für Engadin Bus für Diesel- und Elektrobusse bis 2035 gemäss Flottenmodellierung
 * 2033 erfolgt eine vorgezogene Anschaffung des ersten E-Gelenkbusses
 ** 2035 werden 3 Gelenkbusse frühzeitig ersetzt

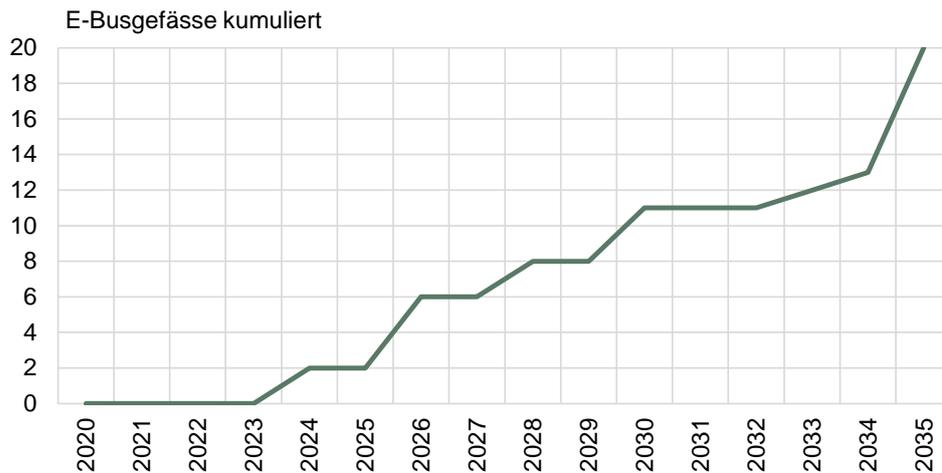


Abbildung 12: 100%-Elektrifizierung bis 2035: Kumulierte Anzahl Elektrobussgefässe bei Engadin Bus.

In der Tabelle 6 sind die zu erwartenden Investitionskosten gemäss des oben aufgeführten angenommenen Beschaffungsplans aufgeführt. Die Berechnung der Investitionskosten der Busse erfolgte inklusive eines Batterieersatzes und basierend auf zu erwartenden Preisentwicklungen bei Batterien und den Fahrzeugen (Kunith 2017, siehe Schlussbericht). Insgesamt handelt es sich um eine statische Investitionsrechnung ohne Abzinsung. Bei den batterieelektrischen Standardbussen wird trotz stark steigender Batteriekapazitäten mit sinkenden Stückpreisen gerechnet. Entsprechend wirkt sich eine späte Beschaffung (gemäss Beschaffungsplan) positiv auf die Kosten aus. Bei den batterieelektrischen Gelenkbussen wird mit einer noch grösseren Zunahme der Batteriekapazitäten gerechnet, die im Oberengadin durchaus notwendig ist. Trotzdem dürften die Stückpreise für batterieelektrische Gelenkbusse bis 2035 gegenüber heute nur leicht ansteigen.

Position	Anzahl	Stückpreis [Fr.]	Gesamtkosten [Fr.]
12m Standardbus (2020-2024) – 288kWh	2	790'000	1'580'000
12m Standardbus (2025-2029) – 350kWh	6	768'000	4'608'000
12m Standardbus (2030-2034) – 400kWh	4	723'000	2'892'000
12m Standardbus (2035+) – 450 kWh	1	677'000	677'000
Total – 12m Standardbusse	13		9'757'000
18m Gelenkbus (2020-2024) – 300kWh	0	880'000	0
18m Gelenkbus (2025-2029) – 400kWh	0	897'000	0
18m Gelenkbus (2030-2034) – 550kWh	1	937'000	937'000
18m Gelenkbus (2035+) – 650kWh	6	901'000	5'406'000
TOTAL – 18m Gelenkbusse	7		6'343'000
TOTAL - Flotte	20		16'100'000

Tabelle 6: Investitionskosten batterieelektrischer Busse (inkl. einer Ersatzbatterie) gemäss angenommenem Beschaffungsplan.

Die Gesamtfahrzeugkosten für eine 100 %-Elektrifizierung der Busflotte belaufen sich auf 16.1 Mio. Fr. bis 2035. Dabei machen die Standardbusse knapp 10 Mio. Fr. aus, wobei bis 2029 Kosten in der Höhe von rund 6 Mio. Fr. anfallen. Unter Annahme heutiger Kosten für Dieselbusse (Midibus: 330'000 Fr., Standardbus 360'000 Fr., Gelenkbus 480'000 Fr.) würde ein herkömmlicher Flottenersatz 8.01 Mio. Fr. kosten. Damit liegt die Anschaffung von batterieelektrischen Bussen inkl. Ersatzbatterien bei doppelten Kosten.

4.2 Beschaffung der Ladeinfrastruktur

Engadin Bus benötigt bei einer 100 %-Elektrifizierung bis 2035 eine jährliche Ladeenergie von etwa 2.5 GWh. Der Jahresstromverbrauch liegt ab 2026 bei rund 700 MWh, ab 2030 bei rund 1.3 GWh und steigt ab 2035 mit der Beschaffung von sechs batterieelektrischen Gelenkbussen nochmals deutlich an (Abbildung 13). Dabei werden folgende durchschnittliche Jahresverbräuche pro Bus bei Engadin Bus angenommen (über alle Tageseinsätze und Sommer, Zwischensaison und Winter gemittelt):

- 116'000 kWh/a pro 12m Standardbus
- 145'000 kWh/a pro 18m Gelenkbus

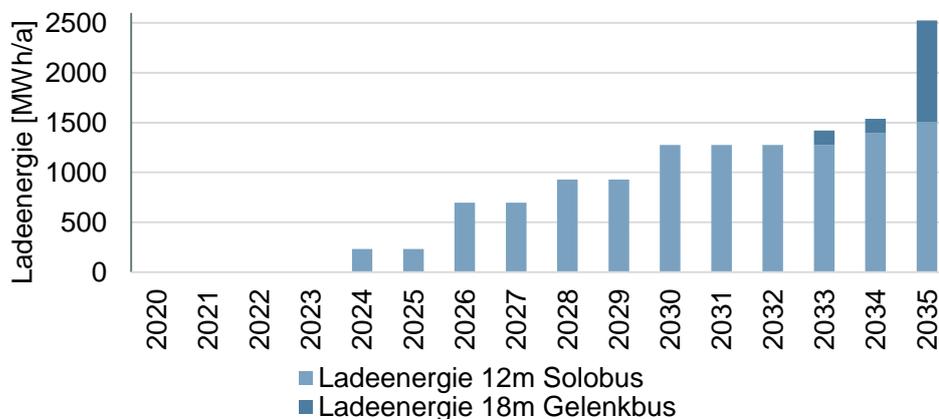


Abbildung 13: Hochlauf der Ladeenergie mit Elektrobussbeschaffung bis 2035

Grundsätzlich müssen alle batterieelektrischen Busse über eine Depotladeinfrastruktur verfügen und die Flottenmodellierung (Kapitel 2) hat gezeigt, dass Streckenlader (Opportunity Charging) auch 2035 notwendig sein werden. Dafür sollen 13 redundante Ladepunkte festgelegt werden. Allenfalls sind dafür Anpassungen bei den Tageseinsätzen und/ oder Fahrplan (Haltezeiten) nötig.

Um die Komplexität des Betriebs der Ladeinfrastruktur nicht unnötig zu erhöhen, empfehlen wir die benötigte elektrische Energie auf Niederspannungsebene (NE7) zu beziehen.

Entsprechend ist für eine 100%-Elektrifizierung folgende Ladeinfrastruktur einzuplanen und mit folgenden Investitionskosten zu rechnen:

Ladeinfrastruktur im Depot

- 20 Ladestecker auf 7 Stromschienen à 50m
- 7 Powerunits à 150kW = 1'050kW Ladeleistung (reicht für Flotte bei 4-5h Laden pro Nacht)
- Absicherung des Gebäudeanschlusses mit einer Stromstärke von 1'500A (bei den angenommenen 1'050kW Ladeleistung)
- Lademanagementsystem (LMS), das Depotladen und Opportunity Charging vom Depot aus regelt
- Kompletter Bau und Inbetriebnahme im Jahr 2024

Die Kosten für die Depotladeinfrastruktur setzen sich wie folgt zusammen (Tabelle 7):

Position	Benötigte Stückzahl	Kosten 2020 [Fr. pro Stk.]	Preiszerfall p.a.
Ladestecker mit Aufrollsystem (CCS2)	20	7'600	3%
Powerunits Ladestationen 150kW mit Netzanschluss und Lüftung	7	89'000	3%
Stromschiene für verschiebbare Ladestecker (50m für 3 Busse) mit Netzanschluss	7	46'000	3%
Lademanagementsystem (LMS), dynamisch	1	80'000	2%
Netzanschlusskosten 1'500A (NE7)	1	280'000	0%

Tabelle 7: Kosten für Depotladeinfrastruktur.

EBP schätzt die statischen Investitionskosten (inkl. Installation) im Depot für 20 Depotlader an 7 Stromschienen mit 7 Powerunits à 150kW sowie den Netzanschlusskosten für 1'500A auf insgesamt 1.46 Mio. Fr.

Streckenladeinfrastruktur (Opportunity Charger)

- 13 Pantographen à 450kW Ladeleistung an den Ladeorten gemäss Tabelle 2
- Absicherung des Anschlusses mit einer Stromstärke von 700A (bei den angenommenen 450kW Ladeleistung)
- Bau: Erster Pantograph würde 2024 gebaut, alle danach proportional zur Busbeschaffung

Die Kosten für die Streckenladeinfrastruktur setzen sich wie folgt zusammen (Tabelle 8):

Position	Benötigte Stückzahl	Kosten 2020 [Fr. pro Stk.]	Preiszerfall p.a.
----------	---------------------	----------------------------	-------------------

Pantograph down inkl. 3x150kW Powerunits (=450kW), Kabelverbindungen und Lüftung	13	354'000	2%
Bau-/Installationskosten Strecke: Pantograph	13	120'000	0%
Netzanschlusskosten 700A (NE7)	13	120'000	0%

Tabelle 8: Kosten für Streckenlader-Ladeinfrastruktur.

EBP schätzt die statischen Investitionskosten für 13 Pantographen mit jeweils 3 Powerunits à 150kW sowie den Netzanschlusskosten für 700A auf etwa 7.72 Mio. Fr.

Abbildung 14 zeigt die benötigte installierte Gesamtladeleistung von etwa 7 MW bei einer 100%-Elektrifizierung bis 2035. Während die Depotladeinfrastruktur mit rund 1 MW auskommt, steigt die installierte Ladeleistung mit jeder Streckenladeinfrastruktur deutlich an (je 450 kW).

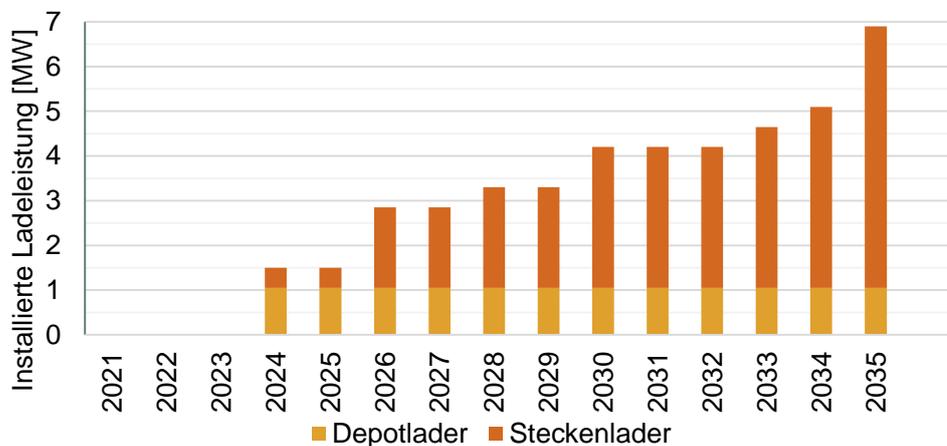


Abbildung 14: Aufbau Ladeinfrastruktur: Hochlauf der Ladeleistung

Kosten für Projektierung, Betrieb und Unterhalt

Neben den Investitionskosten fallen bei der Projektierung, Betrieb und Unterhalt weitere Kosten an. Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

- Planungs- und Projektierungskosten Ladeinfrastruktur (Depot & Streckenlader): 20 % Zuschlag auf die Investitionskosten der reinen Ladeinfrastruktur, ohne Netzanschluss- oder Transformator-Kosten
- Betriebskosten (Personal, Raumkosten) Ladeinfrastruktur (Depot & Streckenlader): 1 % Zuschlag auf Investitionskosten
- Unterhaltskosten (Wartung und Reparatur): 1 % Zuschlag auf Investitionskosten bei Ladeinfrastruktur (Depot & Streckenlader);
- Die Ladeinfrastruktur (Depot & Streckenlader) wird über 15 Jahre abgeschrieben.
- Abrechnungskosten pro Jahr: 1'000 Fr.
- Stromkosten inkl. Abgaben: 0.165 Fr./kWh (exkl. Steuern)
- Leistungspreis des Strombezugs: 96 Fr./kW/Jahr

4.3 Kapitalwertrechnung der Ladeinfrastruktur

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 Dieselnbussen und den Treibstoffkosten von batterieelektrischen Bussen – bestehend aus Stromkosten und Ladeinfrastrukturinvestitionen – aufgestellt werden.

Für das Oberengadin wurde berechnet, mit welchen spezifischen Kosten für die Ladeinfrastruktur und den Strombezug pro gefahrenen Kilometer bei batterieelektrischen Bussen zu rechnen ist, wenn die Ladeinfrastruktur vom einem örtlichen Energieversorger und Verteilnetzbetreiber betrieben würde. Für die Berechnungen aus Sicht eines örtlichen Energieversorgers wurde ein mittlerer Kapitalzins (WACC) von 3.83% (Vorgabe des UVEK für Stromnetz 2020) angenommen.

Die Nettobarwerte der Investitionskosten (Abbildung 15) zeigen, dass rund 80% der Investitionskosten auf die Streckenladeinfrastruktur (Opportunity Charging) entfallen. Die diskontierten Kosten für die Depotladeinfrastruktur liegen bei rund 1.12 Mio. Fr. Bei der Depotladeinfrastruktur sowie bei der Streckenladeinfrastruktur machen die Netzanschlusskosten rund 23% der Gesamtinvestitionskosten aus. Im Falle von 13 Pantographen à 450kW Ladeleistung fallen Netzanschlusskosten von 1.06 Mio. Fr. an.

	Barwerte
Investitionskosten	
Gesamtinvestitionen in Ladeinfrastruktur (Depot)	867'348
Netzanschlusskosten (Depot)	255'233
Gesamtinvestitionen in Ladeinfrastruktur (Opportunity Charging)	3'547'913
Netzanschlusskosten (Opportunity Charging)	1'056'806
Total Investitionskosten	5'727'300

Abbildung 15: Nettobarwerte der Investitionskosten der Ladeinfrastruktur.

Die Nettobarwerte der Entwicklungs- und Betriebsaufwände (Abbildung 16) werden durch die Stromkosten und Leistungspreise dominiert. Über 80 % oder 4.13 Mio. der gesamthaften Entwicklungs- und Betriebsaufwände von 5.08 Mio. Fr. entfallen auf die Stromkosten und Leistungspreise. Dabei sind die Kosten für den Leistungsbezug doppelt so hoch wie die reinen Strombezugskosten.

Aufwand	
Entwicklungsaufwand	
Kosten für Planung und Projektierung	678'509
Total Entwicklungsaufwand	678'509
Betriebsaufwand	
Basis-Stromkosten	1'364'243
Stromkosten Leistungsbezug	2'766'808
Unterhaltskosten Ladestecker und co (Depot)	140'576
Unterhaltskosten pro Pantograph und co (Strecke)	119'722
Betriebskosten Abrechnung	9'016
Telekommunikationskosten	450
Total Betriebsaufwand	4'400'816
Total Aufwand	5'079'325

Abbildung 16: Nettobarwerte der Entwicklungs- und Betriebsaufwände der Ladeinfrastruktur.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die notwendige Ladeinfrastruktur für eine 100%-Elektrifizierung der Busflotte von Engadin Bus bis 2035 eine Depotladeinfrastruktur für die 20 Elektrobusse und zusätzlich 13 Streckenladestationen umfasst. Die totalen Ladeinfrastrukturkosten liegen bei rund 10.84 Mio. Fr (Abbildung 17).

Bei einer marktwirtschaftlichen Refinanzierung des Ladeinfrastruktursystems, z.B. falls ein lokaler Energieversorger den Ladeservice (Ladeinfrastruktur und Strom) Engadin Bus zum Einheitsladepreis anbieten würde, müssten entsprechend der Kosten auch 10.84 Mio. Fr. auf der Ertragsseite stehen (Ertrag aus Ladegeschäft und Restwerte), um zum Break-Even (Kapitalwert = 0) eines solchen Ladeservices zu gelangen.

Dazu stellt sich die Frage: Wie hoch wäre der Einheitsladepreis in Fr./kWh für Engadin Bus, unter der Annahme, dass:

- Ein Energieversorger die Ladeinfrastruktur im Depot und auf der Strecke (Opportunity Charging) vollständig finanziert und baut und
- Engadin Bus der einzige Kunde der Ladeinfrastruktur der Energieversorgers ist?

Wie in Abbildung 17 ersichtlich, müsste der Energieversorger von Engadin Bus einen Einheitsladepreis von 0.97 Fr./kWh verlangen.

Die spezifischen Ladekosten für Engadin Bus wären in diesem Fall mit 185 Fr./100 km für einen Standardbus und mit 243 Fr./100 km für einen Gelenkbus rund 280-290 % höher als die Dieselskosten bei heutigen Bussen (Tabelle 9).

Zusammenfassung	
Investitionskosten	5'727'300
Entwicklungsaufwand	678'509
Betriebsaufwand	4'400'816
Total Kosten	10'806'625
	-
Nötiger Ertrag aus Ladegeschäft (mit untenstehendem Ladepreis)	8'033'370
Restwert der Infrastrukturen in 2035	2'773'255
Total Ertrag	10'806'625
	-
Kapitalwert (=Ertrag-Kosten)	-
Notwendiger Ladepreis [CHF/kWh]	0.9722

Abbildung 17: Zusammenfassung der Kapitalwertrechnung der Ladeinfrastruktur.

	Standardbus 12 m	Gelenkbus 18 m
Dieserverbrauch [l/100 km]	35.7	46.1
Stromverbrauch [kWh/100 km]	190	250
Dieselskosten Fr./100 km *	48	62
Ladeposten Fr./100 km **	185	243
(+% ggü. Dieselskosten)	(+283 %)	(+291 %)

Tabelle 9: Vergleich Lade- und Dieselskosten
 * bei 1.35 Fr./l
 ** bei 0.9722 Fr./kWh (siehe oben)

4.4 Investitionsrechnung 100 % Elektrifizierung bis 2035

Für eine 100%-Elektrifizierung der Busflotte von Engadin Bus bis 2035 ist mit Kosten von gesamthaft mehr als 26.9 Mio. Fr. zu rechnen (Tabelle 10). Die untenstehende Summe ist eine Mischung aus einer statischen Kostenbetrachtung der Busse und einer dynamischen Investitionsrechnung der Ladeinfrastruktur.

Die Beschaffungskosten der 20 batterieelektrischen Busse dominieren die Gesamtkosten mit einem Kostenanteil von knapp 60%. Die Ladeinfrastruktur erfordert Investitionen von über 5.7 Mio. Fr. bis 2035. Die Betriebskosten (insbesondere Stromkosten und Leistungspreise) machen bis 2035 4.4 Mio. Fr. aus. Hinzu kommen Entwicklungsaufwände für die Planung und Bau der Ladeinfrastruktur von 0.7 Mio. Fr.

Position	Beschreibung	Gesamtkosten [Mio. Fr.]
Busse	13 E-Standardbusse, 7 E-Gelenkbusse, statische Kostenrechnung	16.1
Ladeinfrastruktur	20 Depotladeplätze, 13 Streckenladestationen, dynamische Kostenrechnung	5.7
Entwicklungsaufwand	Planung & Bau der Ladeinfrastruktur, dynamische Kostenrechnung	0.7
Betriebskosten	Hauptsächlich Strom- und Leistungspreise, dynamische Kostenrechnung	4.4
Total		26.9

Tabelle 10: Gesamtkosten einer 100 %-Elektrifizierung der Busflotte von Engadin Bus bis 2035

Hebel zur Kostenreduktion

Eine 100 %-Elektrifizierung der Busflotte von Engadin Bus bis 2035 ist technisch machbar (Kapitel 2) und ökologisch sinnvoll (Kapitel 3), allerdings auch mit erheblichen Mehrkosten verbunden.

Gründe für die deutlichen Mehrkosten bei Engadin Bus sind:

- Herausfordernde Einsatzumgebung: Die Tageseinsätze der Bussen sind vom Energiebedarf anspruchsvoll und die Fahrzeugausnutzung maximiert.
- Kleine Busflotte: 13 Standardbusse und 7 Gelenkbusse.
- Radiales Liniennetz: Die Linien starten von einem zentralen Punkt und werden in die Aussengebiete geführt. Entsprechend gibt es wenige Überlappung bei den Haltestellen.

Die herausfordernde Einsatzumgebung führt dazu, dass viele Tageseinsätze auch im Jahr 2035 technisch nur mit Streckenlader elektrifizierbar sind. Die 13 dafür notwendigen Streckenladestationen verursachen hohe Kosten (insbesondere auch hohe Kosten für Leistungspreise) und können nur auf eine kleine Busflotte umgewälzt werden.

Damit eine Elektrifizierung der Busflotte von Engadin Bus auch wirtschaftlich tragbar ist, müssen die Kosten der Ladeinfrastruktur reduziert werden. Dazu wurden folgende Hebel analysiert (Abbildung 18):

1. Anzahl der Streckenladestationen wird durch Anpassungen bei der Linieneinführung auf sieben Stück reduziert.
2. Der Bund, und/ oder Kanton und/ oder die Gemeinden finanzieren den Aufbau der Ladeinfrastruktur zu 50 %.
3. Hebel 1 und 2 werden zusammen genutzt.

Wenn es mit betrieblichen Anpassungen gelingt die Anzahl Streckenladestationen auf sieben Stück zu reduzieren, sinken die Ladekosten um 24 %. Trotzdem bleiben Mehrkosten gegenüber den heutigen Dieseldkosten von rund 200 % (Tabelle 11).

Durch eine finanzielle Unterstützung beim Aufbau der Ladeinfrastruktur durch Bund, Kanton oder Gemeinde in der Höhe von 50 % könnten die Ladekosten deutlich reduziert werden (-36 %). Eine Kombination aus Hebel 1 und 2, also Reduktion der Streckenladestationen auf sieben Stück und 50% Investitionsbeiträge für Ladeinfrastruktur, kann die Ladekosten um über 46 % reduzieren. Die spezifischen Treibstoffkosten pro 100 km sind dann etwa doppelt so hoch wie heutige Dieseldkosten (Tabelle 11).

Bei einer 100 % Finanzierung der Ladeinfrastrukturkosten durch Bund, Kanton oder Gemeinde (wie es in anderen Kantonen angedacht ist) würde der Ladepreis unter dem Dieselpreis liegen.

Zusammenfassung	Basis	Hebel 1	Hebel 2	Hebel 3
Investitionskosten	5'727'300	3'662'504	5'727'300	3'662'504
Entwicklungsaufwand	678'509	453'084	678'509	453'084
Betriebsaufwand	4'400'816	3'582'270	4'433'535	3'582'270
Total Kosten	10'806'625	7'697'858	10'839'344	7'697'858
Ertrag aus Ladegeschäft	8'033'370	6'163'295	5'202'439	4'332'043
Erträge durch Gemeindegzuschüsse	-	-	2'863'650	1'831'252
Restwert der Ladeinfrastruktur in 2035	2'773'255	1'534'563	2'773'255	1'534'563
Total Ertrag	10'806'625	7'697'858	10'839'344	7'697'858
Kapitalwert	-	-	-	-
Notwendiger Ladepreis [CHF/kWh]	0.9722	0.7459	0.6296	0.5243
		(-23%)	(-35%)	(-46%)

Abbildung 18: Zusammenfassung der Kapitalwertrechnung der Ladeinfrastruktur mit Hebel 1, 2 und 3

	Standardbus 12 m: Ladekosten [Fr./ 100 km]	Standardbus 12 m: Mehrkosten ggü. Dieselpreis	Gelenkbus 18 m: Ladekosten [Fr./ 100 km]	Gelenkbus 18 m: Mehrkosten ggü. Dieselpreis
Basis	185	+283 %	243	+291 %
Hebel 1 (7 anstatt 13 Streckenlader)	142	+194 %	186	+200 %
Hebel 2 (50% Förderung der Ladeinfra- struktur)	120	+148 %	157	+153 %
Hebel 3 (Kombination Hebel 1&2)	100	+107 %	131	+111 %

Tabelle 11: Vergleich Lade- und Dieseldkosten mit Hebel 1, 2, 3 und 4

5. Handlungsempfehlung

Die vorliegende Fallstudie zeigt, dass eine 100 %-Elektrifizierung der Liniensbusse von Engadin Bus technisch möglich, ökologisch äusserst vorteilhaft, aber wirtschaftlich herausfordernd ist.

5.1 Reduktion der Mehrkosten

100 %-Elektrifizierung der Busflotte von Engadin Bus

Die technische Bewertung hat gezeigt, dass eine 100 %-Elektrifizierung möglich ist, während vor allem in der Anfangsphase unbedingt Zusatzheizungen mit (Bio-)Diesel oder Bioethanol genutzt werden sollten, um die Elektrifizierung zu vereinfachen. Die ökologische Bewertung hat gezeigt, dass – ausgehend von einem 1:1-Busersatz – batterieelektrische Busantriebe gegenüber Dieseln Bussen die gesamten Umweltauswirkungen im Mittel um etwa 75 % und die CO₂-Emissionen um etwa 85 % reduzieren können. Mit einer Zusatzheizung mit fossilem Diesel, liegen die Reduktionen der CO₂-Emissionen 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 im Betrieb (Ladeposten) erhebliche, spezifische Mehrkosten von 280-290 % gegenüber den Dieseln Bussen anfallen. Um die Mehrkosten im Betrieb zu reduzieren empfehlen wir folgende Schritte:

1) Späte Beschaffung der batterieelektrischen Busse

In den nächsten Jahren ist mit stark steigenden Batteriekapazitäten bei Elektrobussen bei gleichzeitig sinkenden spezifischen Batteriekosten zu rechnen. Die wirtschaftliche Betrachtung einer Umstellung auf Elektrobusse verbessert sich daher bei einer späteren Beschaffung der Fahrzeuge. Wir empfehlen die ersten batterieelektrischen Standardbusse (Depotlader) ab 2024 anzuschaffen. Batterieelektrische Gelenkbusse sollten erst ab 2033 angeschafft werden.

2) 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 Streckenladeinfrastruktur und damit einen wichtigen Kostenpunkt.

3) Anzahl der nötigen Streckenlader durch systemische Anpassungen reduzieren

Streckenladeinfrastruktur ist für die 100 %-Elektrifizierung bei Engadin Bus notwendig. Allerdings erschweren ihre hohen Kosten die Finanzierung einer Flottenumstellung. Daher sollte die Anzahl der Streckenlader und damit ihre Kosten soweit, wie möglich reduziert werden, indem:

- Wenige Ladeplätze mit hoher Frequentierung durch mehrere Linien bestimmt werden.

- Systemische Anpassungen, wie längere Wartezeiten in Endhaltestellen, Zwischenstopps im Depot, Änderungen der Umlaufzusammensetzung oder Aufteilungen der Umläufe vorgesehen werden.
- Mehr Busgefässe angeschafft werden und anspruchsvolle Tageseinsätze einen Buswechsel vornehmen.
- Die Leistungsentgelte infolge von Leistungsspitzen durch den Einsatz von dezentralen Batterien beim Pantographen reduziert werden.

4) **Energieversorger als Komplettanbieter der Ladeinfrastruktur**

Der Aufbau der Ladeinfrastruktur im Depot und entlang der Busstrecke ist technisch aufwändig und kostspielig. Es fallen hohe Netzanschlusskosten und Leistungspreise an. Wir empfehlen, dass ein lokaler Energieversorger für die Projektierung, Bau und Betrieb der Ladeinfrastruktur verantwortlich ist und Engadin Bus den Ladestrom zu einem Einheitsladepreis Fr./kWh anbietet.

Dies empfiehlt sich aus zwei Gründen: Erstens ist für ein kleines Busunternehmen, wie Engadin Bus der Aufbau der nötigen Kompetenzen im Bereich der Ladeinfrastruktur, insbesondere bei den Streckenladern, aufwändig und kann zu einem personellen Mehrbedarf führen. Bei den lokalen Energieversorgern sind die nötigen energietechnischen Kompetenzen vorhanden und personelle Mehraufwände können durch vorhandene Mitarbeiter geleistet werden und falls es zu Neuanstellungen kommen würde, lägen Überschneidungen mit dem Kerngeschäft der Energieversorger vor. Zweitens würde es zu einem effizienten Umgang mit den Kapazitäten des Verteilnetzes kommen. Als Betreiber der Ladeinfrastruktur läge es im Eigeninteresse der Energieversorger, die meist zugleich Betreiber der Verteilnetze sind, den Ausbau von Verteilnetzen gering zu halten. Sie könnte beim Bau und Betrieb der Ladeinfrastruktur von der genauen Kenntnis seines Netzgebiets profitieren und die Ladeinfrastruktur und den Netzbetrieb aufeinander abstimmen. Durch geschicktes Lademanagement und mögliche zusätzliche Batteriespeicher zur Netzentlastung könnte so dem NOVA-Prinzip (Netzoptimierung vor Ausbau) Rechnung getragen werden.

Zuletzt ermöglichen Bau und Betrieb durch einen lokalen Energieversorger einen lukrativen Stromabsatz und erzeugen so lokale Wertschöpfung im Oberengadin.

Die Analyse hat gezeigt, dass die oben aufgeführten Massnahmen die Kosten substanziell reduzieren können. Trotzdem fallen bei einer 100 %-Elektrifizierung erhebliche Mehrkosten im Betrieb von rund +200 % gegenüber Diesel-Bussen an (gemäss Hebel 1 in Kapitel 4.4 «Reduktion der Anzahl Streckenlader auf 7 anstatt 13»). Kostentreiber ist die teure Streckenladeinfrastruktur. Daher gilt es für eine 100 %-Elektrifizierung mit Bund, Kanton oder Gemeinden über eine finanzielle Unterstützung beim Aufbau der Streckenladeinfrastruktur zu sprechen. In anderen Kantonen wird der Aufbau der Ladeinfrastruktur ebenfalls durch den Kanton finanziell unterstützt.

Eine 100 %-Elektrifizierung ist nur mit einer Übernahme der Mehrkosten der Fahrzeuge und einer Förderung der Ladeinfrastruktur möglich. Andernfalls sollte eine Teilelektrifizierung ins Auge gefasst werden.

5.2 Teilelektrifizierung der Busflotte von Engadin Bus

Kostentreiber bei der Umstellung auf batterieelektrische Busse ist bei Engadin Bus die Streckenladeinfrastruktur. Tageseinsätze, die mit reinem Depotladen auskommen, sind ökonomisch umsetzbar, ökologisch attraktiv und könnten ab 2024 im Rahmen einer Teilelektrifizierung umgesetzt werden.

Sofern keine grosszügige Förderung der Ladeinfrastruktur auf der Strecke durch die öffentliche Hand vorgesehen ist, empfehlen wir die Busflotte ausschliesslich mit reinen Depotladern zu elektrifizieren. Tageseinsätze, die mit Depotladern aufgrund der herausfordernden Einsatzumgebung technisch nicht elektrifizierbar sind, werden bis 2035 durch (Plug-in-)Hybridbusse ergänzt, während die technische und preisliche Entwicklung der Batterie- und Brennstoffzellenbusse in den kommenden Jahren weiter zu beobachten ist.

Der angenommene Beschaffungsplan einer Teilelektrifizierung (Tabelle 12) sieht die erste Beschaffung eines batterieelektrischen Standardbusses (Depotlader) im Jahr 2024 vor.

Ablösungs- jahr	Depotlader E-Midibus	Depotlader E-Standard- bus	Depotlader E-Gelenk- bus	Diesel- Hybrid Midibus	Diesel- Hybrid Standard- bus	Diesel- Hybrid Gelenkbus
2020					1	
2021						4
2022						1
2023				1		2
2024		1			1	
2025						
2026		1			3	
2027						
2028		1			1	
2029						
2030		1			2	
2031-2033						
2034		1				
2035			1			3
Total* 2022-2035	0	5	1	1	7	6

Tabelle 12: Vorgeschlagener Beschaffungsplan für Engadin Bus bei einer Teilelektrifizierung bis 2035 mit Depotladern und Hybrid-Dieselnbussen gemäss Flottenmodellierung.

In der Periode 2025 bis 2029 werden zwei weitere Depotlader-Standardbusse beschafft. Hinzu kommen vier Diesel-Hybrid-Standardbusse. Zwischen 2030 und 2034 werden nochmals zwei Depotlader-Standardbusse sowie zwei Diesel-Hybrid-Standardbusse angeschafft und 2035 kommt der erste Depotlader-Gelenkbus zur Flotte hinzu. Ebenfalls im Jahr 2035 werden drei Diesel-Hybrid-Gelenkbusse angeschafft. Unter diesen Voraussetzungen zeigt Abbildung 19 die kumulierte Anzahl an batterieelektrischen Busgefässen entsprechend des Beschaffungsplans. Bis 2030 werden insgesamt vier Depotlader-Standardbusse beschafft. Bis 2035 kommt nochmals ein Standard- und Gelenkbus als Depotlader dazu. Damit sind 6 der 20 Busgefässe bis 2035 batterieelektrisch als reine Depotlader bei Engadin Bus unterwegs. Das entspricht einer 30 %-Elektrifizierungsstrategie.

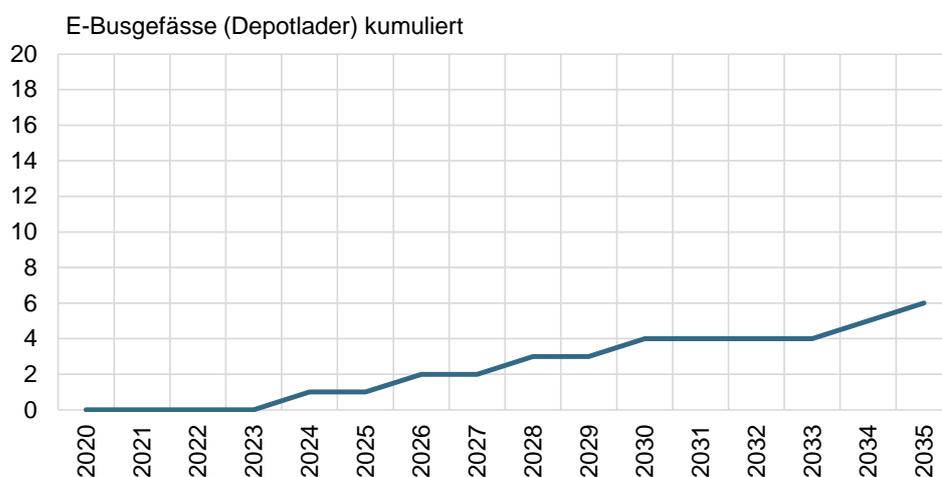


Abbildung 19: Teilelektrifizierung bis 2035: Kumulierte Anzahl Elektrobusgefässe (Depotlader) bei Engadin Bus

Position	Anzahl	Stückpreis [Fr.]	Gesamtkosten [Fr.]
12m Standardbus (2020-2024) – 288kWh	1	790'000	790'000
12m Standardbus (2025-2029) – 350kWh	2	768'000	1'536'000
12m Standardbus (2030-2034) – 400kWh	2	723'000	1'446'000
12m Standardbus (2035+) – 450 kWh	0	677'000	0
Total – 12m Standardbusse	5		3'772'000
18m Gelenkbus (2020-2024) – 300kWh	0	880'000	0
18m Gelenkbus (2025-2029) – 400kWh	0	897'000	0
18m Gelenkbus (2030-2034) – 550kWh	0	937'000	0
18m Gelenkbus (2035+) – 650kWh	1	901'000	901'000
TOTAL – 18m Gelenkbusse	1		901'000
TOTAL - Flotte	6		4'673'000

Tabelle 13: Investitionskosten batterieelektrischer Busse (inkl. einer Ersatzbatterie) gemäss Beschaffungsplan einer 30 %-Teilelektrifizierung.

Unter Annahme heutiger Kosten für Dieselbusse (Standardbus 360'000 Fr., Gelenkbus 480'000 Fr.) würden fünf Standardbusse und ein Gelenkbus 2.28 Mio. Fr. kosten.

Für eine Teilelektrifizierung ist folgende Depotladeinfrastruktur nötig:

- 6 Ladestecker auf 3 Stromschienen à 50m
- 3 Powerunits à 150kW = 450kW Ladeleistung (reicht für Flotte bei 4-5h Laden pro Nacht)
- Absicherung des Gebäudeanschlusses mit einer Stromstärke von 700A (bei den angenommenen 450kW Ladeleistung)
- Lademanagementsystem (LMS), das Depotladen und Opportunity Charging vom Depot aus regelt
- Kompletter Bau und Inbetriebnahme im Jahr 2024

Die Kosten für die Depotladeinfrastruktur der Teilelektrifizierung setzen sich wie folgt zusammen (Tabelle 14):

Position	Benötigte Stückzahl	Kosten 2020 [Fr. pro Stk.]	Preiszerfall p.a.
Ladestecker mit Aufrollsystem (CCS2)	6	7'600	3%
Powerunits Ladestationen 150kW mit Netzanschluss und Lüftung	3	89'000	3%
Stromschiene für verschiebbare Ladestecker (50m für 3 Busse) mit Netzanschluss	3	46'000	3%
Lademanagementsystem (LMS), dynamisch	1	80'000	2%
Netzanschlusskosten 700A (NE7)	1	120'000	0%

Tabelle 14: Kosten für Depotladeinfrastruktur bei Teilelektrifizierung.

EBP schätzt die statischen Investitionskosten (inkl. Installation) im Depot bei einer Teilelektrifizierung für 6 Depotlader an 3 Stromschienen mit 3 Powerunits à 150kW sowie den Netzanschlusskosten für 700A (NE7) auf rund 543'000 Fr.

Analog zur Berechnung der Nettobarwerte in Kapitel 4.3 wird in der Folge die Kapitalwertrechnung der Ladeinfrastruktur für eine 30 %-Teilelektrifizierung gezeigt.

Für die sechs Elektrobusse würden abdiskontierte Depotladeinfrastrukturkosten inkl. Netzanschlusskosten von rund 500'000 Fr. anfallen (Abbildung 20).

Investitionskosten	
Gesamtinvestitionen in Ladeinfrastruktur (Depot)	392'325
Netzanschlusskosten (Depot)	109'385
Gesamtinvestitionen in Ladeinfrastruktur (Opportunity Charging)	-
Netzanschlusskosten (Opportunity Charging)	-
Total Investitionskosten	501'710

Abbildung 20: Nettobarwerte der Investitionskosten einer Teilelektrifizierung

Die Nettobarwerte der Entwicklungs- und Betriebsaufwände (Abbildung 21) werden durch die Stromkosten dominiert (87 % der Kosten). Wie im Kapitel 4.3 empfohlen, gehen wir hier davon aus, dass ein Energieversorger als Komplettanbieter der Ladeinfrastruktur auftritt.

Aufwand	
Entwicklungsaufwand	
Kosten für Planung und Projektierung	78'465
Total Entwicklungsaufwand	78'465
Betriebsaufwand	
Basis-Stromkosten	481'192
Stromkosten Leistungsbezug	352'309
Unterhaltskosten Ladestecker und co (Depot)	42'173
Betriebskosten Abrechnung	9'016
Total Betriebsaufwand	884'689
Total Aufwand	963'154

Abbildung 21: Nettobarwerte der Entwicklungs- und Betriebsaufwände einer Teilelektrifizierung

Die Gesamtkosten für die notwendige Ladeinfrastruktur für eine 30 %-Elektrifizierung der Busflotte von Engadin Bus bis 2035 mit fünf batterieelektrischen Standardbussen und einem Gelenkbus inkl. Entwicklungs- und Betriebskosten (Stromkosten) über 15 Jahre liegen bei rund 1.46 Mio. Fr. (Abbildung 22).

Bei einer marktwirtschaftlichen Refinanzierung des Ladeinfrastruktursystems, z.B. falls ein lokaler Energieversorger den Ladeservice (Ladeinfrastruktur und Strom) Engadin Bus zum Einheitsladepreis anbieten würde, müssten entsprechend der Kosten auch 1.46 Mio. Fr. auf der Ertragsseite stehen (Ertrag aus Ladegeschäft und Restwerte, so dass Kapitalwert = 0). Wie in Abbildung 22 ersichtlich, müsste der Energieversorger dafür von Engadin Bus einen Einheitsladepreis von 0.47 Fr./kWh verlangen.

Die spezifischen Ladekosten für Engadin Bus wären in diesem Fall mit 89 Fr./100 km für einen Depotlader-Standardbus und mit 117 Fr./100 km für einen Depotlader-Gelenkbus und damit 85 bis 89 % höher als die Dieselskosten bei heutigen Bussen (Tabelle 15).

Zusammenfassung	
Investitionskosten	501'710
Entwicklungsaufwand	78'465
Betriebsaufwand	884'689
Total Kosten	1'464'865
Nötiger Ertrag aus Ladegeschäft (mit untenstehendem Ladepreis)	1'369'563
Restwert der Infrastrukturen in 2035	95'302
Total Ertrag	1'464'865
Kapitalwert (=Ertrag-Kosten)	-
Notwendiger Ladepreis [CHF/kWh]	0.4699

Abbildung 22: Zusammenfassung der Kapitalwertrechnung einer Teilelektrifizierung

	Standardbus 12 m	Gelenkbus 18 m
Dieserverbrauch [l/100 km]	35.7	46.1
Stromverbrauch [kWh/100 km]	190	250
Diesekosten Fr./100 km *	48	62
Ladekosten Fr./100 km **	89	117
(+% ggü. Diesekosten)	(+85 %)	(+89 %)

Tabelle 15: Vergleich Lade- und Diesekosten bei einer Teilelektrifizierung
 * bei 1.35 Fr./l
 ** bei 0.4699 Fr./kWh (siehe oben)

Investitionsrechnung 30 %-Elektrifizierung bis 2035

Für eine 30 %-Elektrifizierung der Busflotte von Engadin Bus bis 2035 ist mit Kosten von gesamthaft 6.2 Mio. Fr. zu rechnen (Tabelle 16).

Die Beschaffungskosten der sechs Elektrobusse dominieren die Gesamtkosten mit einem Kostenanteil mit über 75 % deutlich.

Position	Beschreibung	Gesamtkosten [Mio. Fr.]
Elektro-Busse	5 E- Standardbusse, 1 E-Gelenk-busse, statische Kostenrechnung gemäss Tabelle 13	4.7
Ladeinfrastruktur	6 Depotladeplätze, dynamische Kostenrechnung	0.5
Entwicklungsaufwand	Planung & Bau der Ladeinfrastruktur, dynamische Kostenrechnung	0.1
Betriebskosten	Hauptsächlich Strom- und Leistungspreise, dynamische Kostenrechnung	0.9
Total		6.2

Tabelle 16: Gesamtkosten einer 30 %-Elektrifizierung der Busflotte von Engadin Bus bis 2035.