

Bundesamt für Energie BFE

Abschätzung des Einsatz- und CO₂- Reduktionspotenzials durch Busse mit nicht fossilen Antriebstechnologien und Fördermöglichkeiten Grundlagenstudie

Schlussbericht
Zürich/Bern, 12. Oktober 2020

Matthias Lebküchner, Hans-Jörg Althaus, Anne Greinus, Cornelia Graf, Brian Cox,
Silvan Köppel

Impressum

Abschätzung des Einsatz- und CO₂-Reduktionspotenzials durch Busse mit nicht fossilen Antriebstechnologien und Fördermöglichkeiten

Grundlagenstudie

Schlussbericht

Zürich/Bern, 12. Oktober 2020

3422a_E-Bus-BFE_Schlussbericht_final_20201012.docx

Auftraggeber

Bundesamt für Energie BFE

Energieeffizienter Verkehr

Die Studie wurde durch das Programm «Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr» des Bundesamtes für Verkehr BAV finanziert.

Projektleitung

Roberto Bianchetti, BFE

Autorinnen und Autoren

Matthias Lebküchner, Hans-Jörg Althaus, Anne Greinus, Cornelia Graf, Brian Cox, Silvan Köppel

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

zuerich@infras.ch

Begleitgruppe

Roberto Bianchetti, BFE

Christoph Schreyer, BFE

Delphine Morlier, BFE

Elena Burri, BFE

Andrea Müller BAV

Markus Liechti, BAV

Tristan Chevroulet, BAV

Walter Josi, BAV

Nicolas Schmidt, BAFU

Philipp Hallauer, BAFU

Isabel Scherrer, ARE

Kilian Constantin, VÖV

Patrick Ruggli, KKDÖV

Paul Schneeberger, SSV

Dominik Saner, Postauto

Roman Zürcher, RBS

David Sorg, VBZ

Olivier Augé, TPG

Ralf Kollegger, Engadin Bus

Andrea Vezzini, BFH

Inhalt

Zusammenfassung	6
Résumé	19
Compendio	33
1. Auftrag und Vorgehen	46
2. Bestandsanalyse Dieselbuslinien in der Schweiz	47
2.1. Rücklauf und Stichprobe der TU-Umfrage	47
2.2. Flottenkennzahlen	49
2.3. Linienkennzahlen	54
3. Antriebssysteme und zukünftige Entwicklungen	56
3.1. Terminologie / Definitionen	56
3.2. Antriebstechnologien	57
3.2.1. Auswahl der zu betrachtenden Optionen	57
3.2.2. Batteriebusse	59
3.2.3. Brennstoffzellenbusse	63
3.2.4. Hybride und Plug-In-Hybrid	64
3.2.5. Fahrzeugkosten im Vergleich	66
3.2.6. Umweltaspekte der Fahrzeugherstellung im Vergleich	67
3.3. Technische Einsatzpotenziale in der Schweiz	69
4. Auswirkungsanalyse	74
4.1. Vorgehen und Kriterien	74
4.2. Fallbeispiele	77
4.2.1. Übersicht	77
4.2.2. Definition Fallbeispiele Ortsverkehr	79
4.2.3. Definition Fallbeispiele Regionalverkehr-Mittelland	81
4.2.4. Definition Fallbeispiele Regionalverkehr-Berggebiet	84
4.3. Kosten	86

4.3.1.	Ergebnisse Ortsverkehr _____	86
4.3.2.	Ergebnisse zum Regionalverkehr-Mittelland _____	94
4.3.3.	Ergebnisse zum Regionalverkehr-Berggebiet _____	98
4.3.4.	Hybridbusse _____	101
4.4.	Ökologie _____	102
4.4.1.	Treibhausgasemissionen _____	102
4.4.2.	Primärenergieverbrauch _____	104
4.4.3.	Lokale Luftschadstoffemissionen _____	106
4.4.4.	Lärmemissionen _____	108
4.5.	CO ₂ -Vermeidungskosten _____	108
4.6.	Weitere Kriterien _____	111
4.7.	Anforderungen an die Stromversorgung für Batteriebusse _____	114
4.8.	Wichtigste Erkenntnisse – Zusammenfassung _____	114
5.	Regulatorische Rahmenbedingungen, ÖV-Finanzierung und Fördermöglichkeiten _	118
5.1.	Vorbemerkungen _____	118
5.2.	Aktuelle Rahmenbedingungen sowie Finanzierung und Förderungen in der Schweiz _	120
5.2.1.	Regulatorische Rahmenbedingungen der Transportunternehmen und Finanzierung im ÖV _____	120
5.2.2.	Nationale Fördermassnahmen und weitere Finanzierungsinstrumente des Bundes __	129
5.2.3.	Kantonale Rahmenbedingungen und ausgewählte kommunale Fördermassnahmen _	136
5.2.4.	Zwischenfazit _____	157
5.3.	Blick ins Ausland _____	162
5.3.1.	Europäischer Rechtsrahmen (Clean Vehicle Directive) _____	163
5.3.2.	Fallstudien Ausland _____	164
5.3.3.	Beschaffungsoptionen und Finanzierungsmöglichkeiten _____	169
5.3.4.	Zwischenfazit _____	173
6.	Synthese _____	175
6.1.	Potenzial für fossilfreie Busse und Mehrkosten _____	175
6.2.	Finanzierungsbedarf und Förderinstrumente _____	184
6.3.	Fazit _____	193
Annex	_____	196
A1.	Hintergrund zu Batterien für Elektromobilität _____	196
A1.1.	Eigenschaften von Batterien und Annahmen zu deren Entwicklung _____	196

A1.2.	Recycling oder «second life» von Batterien am Lebensende _____	201
A1.3.	Umweltaspekte und Rohstoffkritikalität _____	202
A2.	Hintergrund zu Brennstoffzellen _____	214
A3.	Hintergrund zu erneuerbaren Treibstoffen _____	216
A3.1.	Biotreibstoffe _____	216
A3.2.	Synthetische Treibstoffe _____	218
A4.	Hintergrund zu Lärm von konventionellen und elektrischen Bussen _____	220
A5.	Annahmen für die Kostenrechnung _____	224
A5.1.	Allgemeine Annahmen _____	224
A5.2.	Kostenannahmen Busse _____	225
A5.3.	Kostenannahmen Ladeinfrastruktur _____	226
A6.	Annahmen für die Umweltbilanzierung _____	227
A6.1.	Fahrzeugmassen _____	227
A6.2.	Energiebedarf _____	229
A6.3.	Emissionsfaktoren _____	231
A7.	Detailergebnisse zu den Kostenrechnungen _____	232
A8.	Annahmen zu Batteriebus-Mix für die Hochrechnung der Mehrkosten _____	241
	Abbildungsverzeichnis _____	245
	Tabellenverzeichnis _____	248
	Abkürzungen _____	250
	Literatur _____	251

Zusammenfassung

Auftrag und Vorgehen

Fossilfreie Antriebstechnologien könnten den öffentlichen Busverkehr in der Schweiz umweltfreundlicher machen. Heute stehen im öffentlichen Verkehr rund 5'500 Dieselsebusse im Einsatz. Davon fahren etwa zwei Drittel auf Regionallinien und ein Drittel im Ortsverkehr. Die heute teilweise hohen Mehrkosten gegenüber Dieselsebussen erschweren jedoch die Umstellung auf umweltfreundlichere Antriebe. Aus Sicht der Energie- und Klimapolitik ist die Förderung von fossilfrei angetriebenen Bussen im öffentlichen Busverkehr zu begrüssen. Der Ersatz von Dieselsebussen würde dadurch wesentlich beschleunigt und der ÖV würde eine Vorbildfunktion einnehmen. Heute sind jedoch weder Kosten noch Nutzen einer Förderung verlässlich zu beziffern. Deshalb sollen belastbare Grundlagen zum Einsatz- und CO₂-Reduktionspotenzial von Bussen mit alternativen Antrieben geschaffen werden, als Basis für den Postulatsbericht 19.3000 «Nichtfossilen Verkehrsträgern im öffentlichen Verkehr auf Strassen zum Durchbruch verhelfen».

Die vorliegende Grundlagenstudie zeigt unter Berücksichtigung des technologischen Fortschritts auf, welche fossilfreien Antriebsoptionen sich im öffentlichen Busverkehr aus technologischer Sicht eignen und welche Kosten und welcher Umweltnutzen damit verbunden sind. Daraus abgeleitet werden heutige bzw. zukünftige Mehrkosten gegenüber den Dieselsebussen. Weiter zeigt die Studie, wieweit sich diese Mehrkosten mit den bestehenden Rahmenbedingungen und Fördermöglichkeiten im bestellten ÖV finanzieren lassen. Daraus abgeleitet wird der Finanzierungsbedarf zur verstärkten Förderung fossilfreier Antriebstechnologien. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Dieselsebusse heute rund 2% der CO₂-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz ausmachen. Allfällige Fördermechanismen sollten daher einfach und effizient gehalten sein.

Welche fossilfreien Antriebsoptionen für den öffentlichen Busverkehr?

In einer Auswirkungsanalyse wurden unter der Prämisse «fossilfrei» Elektrobusse sowie Busse mit Verbrennungsmotoren, die mit Biotreibstoffen (Biodiesel und Biogas) angetrieben werden, untersucht und mit dem konventionellen Dieselsebus Euro 6 verglichen. Bei den Elektrobussen wurden einerseits Batteriebusse mit verschiedenen Ladekonzepten¹ und andererseits Brennstoffzellenbusse berücksichtigt.

¹ Depotlader: Busse mit grossen Batterien, die über Nacht während mehreren Stunden im Depot laden.
Gelegenheitslader statisch: Busse mit kleinen Batterien, die im Stillstand, typischerweise an Endhaltestellen, während mehreren Minuten laden.
Gelegenheitslader dynamisch, auch Batterietrolleybus genannt: Busse, die teilweise am Oberleitungsnetz fahren und während dieser Zeit eine Batterie, die auch fahrleitungsloses Fahren ermöglicht, laden.

Aus ökologischer Sicht weisen die Batterie-Busse klare Vorteile auf, sowohl bei den Treibhausgasemissionen und beim Primärenergiebedarf als auch bei den lokalen Luftschadstoffen und beim Lärm in den Quartieren. Emissionsseitig bewegen sich die positiven Effekte bei den lokalen Umweltbelastungen im Orts- und im Regionalverkehr in ähnlichen Grössenordnungen. Hinsichtlich der Betroffenheit sind jedoch die Effekte beim Ortsverkehr grösser als beim Regionalverkehr.

Der mit Wasserstoff betriebene Brennstoffzellenbus schneidet bzgl. Treibhausgasemissionen und lokaler Luftschadstoffe ähnlich ab wie die Batteriebusse. Er weist aber einen sehr hohen Primärenergiebedarf auf, weil einerseits die Herstellung von Wasserstoff energieintensiv ist und andererseits die Umwandlung von Wasserstoff in Strom in der Brennstoffzelle mit grossem Energieverlust verbunden ist.

In Batteriebussen sind im Vergleich zu Dieseln mehr potenziell kritische Materialien verbaut. Die relevantesten sind Lithium, Kobalt, Graphit und Seltene Erden. Die ersten drei sind vor allem in den Batterien enthalten, Seltene Erden vorwiegend in den Elektromotoren. Mit den heute bekannten Recyclingverfahren können diese Materialien zu fast 100% zurückgewonnen werden. Bei Busbatterien ist davon auszugehen, dass aufgrund des in der Batterie gespeicherten Materialwerts ein Recycling am Lebensende tatsächlich stattfinden wird. Trotzdem kann bei wachsendem Bestand an Batteriefahrzeugen (v.a. im PW-Bereich) die Nachfrage nach diesen kritischen Materialien so stark steigen, dass sich langfristig Knappheiten ergeben werden. Da all diese Materialien in Elektrofahrzeugen aber substituierbar sind, werden Optionen bestehen, mit allfälligen Knappheiten umzugehen.

Die Biotreibstoffe weisen zwar einen geringeren Primärenergiebedarf als die Elektrobusse auf, weil der Energieinhalt der Abfälle, aus denen die hier betrachteten Biotreibstoffe hergestellt wurden, aufgrund einer methodischen Setzung in der Ökobilanz nicht mitgezählt wird. Sie haben aber ein geringeres Treibhausgas-Reduktionspotenzial (Biogas) als Elektrobusse und bringen gegenüber Dieseln keine massgebenden Verbesserungen bei den lokalen Luftschadstoffemissionen und beim Lärm (Biogas und Biodiesel).

Kostenmässig ist zu unterscheiden nach der kurzfristigen Situation und den absehbaren Entwicklungen. Ebenso sind die preislichen Rahmenbedingungen relevant, die zum Teil auch von regulatorischen Festlegungen abhängen (z. Bsp. Mineralölsteuer-Rückerstattung). Unter den heutigen Rahmenbedingungen sind die Batteriebusse kurzfristig noch vergleichsweise teuer und die Einsatzpotenziale für zweckmässige Einsätze beschränkt (v.a. für den Depotlader mit noch ungenügenden Reichweiten pro Ladung). Längerfristig haben die Batteriebusse aber das Potenzial, je nach Einsatzbedingungen und Annahmen zur Batterie-Lebensdauer, die kostengünstigsten Optionen zu werden. Positiv zugunsten der Batteriebusse würde sich auch die

Aufhebung der Mineralölsteuer-Rückerstattung auswirken, die heute die Dieselsebusse begünstigt.

Kurzfristig stellen die Biotreibstoffe tendenziell die günstigsten Optionen dar. Fraglich ist jedoch, ob in einer Übergangsphase, bis die Vorteile der Batterie-Busse voll zum Tragen kommen, auf diese Optionen umgeschwenkt werden soll. Denn hierfür wären Biodiesel- und Biogastankstellen zu errichten sowie Werkstattanpassung und Personalumschulungen für eine Übergangstechnologie erforderlich. Gegen Biotreibstoffe spricht auch die beschränkte Verfügbarkeit insbesondere für in der Schweiz hergestellte Biotreibstoffe. CH-Biodiesel aus gebrauchtem Speiseöl (Used Cooking-Oil) dürfte beispielsweise nicht für alle ÖV-Busse der Schweiz ausreichen und könnte somit höchstens auf einzelnen Linien eine Option darstellen. In diesem Zusammenhang stellt sich deshalb auch die Frage, ob aus einer über den öffentlichen Verkehr hinausgehenden Gesamtsicht eine Verwendung von Biotreibstoffen in Bereichen im Vordergrund stehen soll, wo andere Alternativen für eine Reduktion der Treibhausgasemissionen zurzeit noch fehlen, zum Beispiel im Langstrecken-Strassengüterverkehr, in der Hochseeschiffe oder im Flugverkehr. Analoges gilt auch für Plug-in-Hybridbusse mit Biotreibstoffen.

Aus einer Gesamtbetrachtung über Kosten und Umweltnutzen sollen folglich Elektrobusse als fossilfreie Alternative zu den Dieselsebussen im Fokus stehen, dies bereits kurz-/mittelfristig, allerdings nur für aus Kostensicht zweckmässige Einsätze. Längerfristig wird sich aufgrund der absehbaren Entwicklungen bei den Batteriebussen, sowohl in technischer Hinsicht als auch bzgl. Kosten, das Potenzial für zweckmässige Einsätze sowohl im Orts- als auch im Regionalverkehr stark erhöhen. Damit sinken auch die kurzfristig vergleichsweise hohen CO₂-Vermeidungskosten der Elektrobusse deutlich auf Werte unter 200 CHF pro Tonne CO₂. Bei einer Aufhebung der Mineralölsteuerrückerstattung sinken sie – unter idealen Einsatzbedingungen – sogar gegen Null. Im Zusammenhang mit den vor allem kurzfristig noch hohen CO₂-Vermeidungskosten ist zu berücksichtigen, dass Elektrobusse, im Gegensatz zu mit Biotreibstoffen angetriebenen Bussen, helfen, weitere externe Kosten in den Bereichen Lärm und Luftschadstoffe zu vermeiden, die zusammen rund drei Mal so hoch sind wie die Klimakosten des Verkehrs (INFRAS & Ecoplan 2019). Die Mehrkosten sollen daher nicht nur in Bezug zur CO₂-Reduktion betrachtet werden.

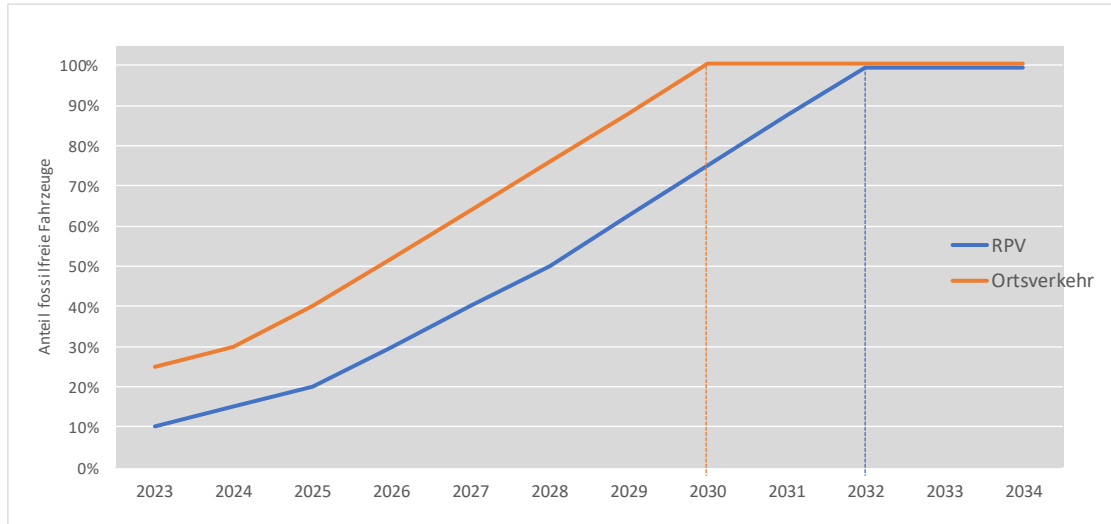
Welche E-Bus-Optionen – Batterietrolleybus, Depotlader, Gelegenheitslader statisch oder auch der Brennstoffzellenbus, wenn bspw. grosse Einsatzreichweiten über 400-500 km pro Tag erforderlich sind – im Vordergrund stehen, hängt jeweils von den spezifischen Umfeldbedingungen einer Linie oder eines Liniennetzes. Dies kann bzw. soll auch nicht in dieser Grundlagenstudie vorgegeben werden.

Potenzial für Batteriebusse und Mehrkosten

Rein technisch wäre es möglich, bei den anstehenden Ersatzbeschaffungen jeweils sämtliche Fahrzeuge durch fossilfreie Busse zu ersetzen (im Folgenden als Szenario «maximal» bezeichnet). Die Batteriebusse sind heute jedoch noch vergleichsweise teuer. Sie werden deshalb kurzfristig noch in vielen Einsatzfeldern aus wirtschaftlicher Sicht als nicht zweckmässig beurteilt. Einerseits sind die Fahrzeuge und Batterien auf dem Markt generell noch teuer. Andererseits wären aufgrund noch zu geringer Reichweiten (beim Depotlader) oder ungenügender Wendezeiten zum Nachladen am Linienende (Gelegenheitslader statisch) zusätzliche Fahrzeuge gegenüber dem Dieselbusbetrieb erforderlich.

Vor allem aus Kostenüberlegungen, aber auch aufgrund entsprechender Vorlaufzeiten für die Beschaffung der Fahrzeuge, die Herrichtung der Ladeinfrastrukturen und die Schulung des Personals ist es kurz-/mittelfristig nicht zweckmässig bzw. realistisch, bei den anstehenden Busersatzbeschaffungen in den nächsten Jahren sämtliche Dieselbusse durch Batteriebusse zu ersetzen. Deshalb wurde – in Anlehnung an aktuelle E-Busstrategien von Transportunternehmen – ein «realistisches» Szenario für die Umstellung von Diesel- auf Batteriebusse definiert. Dieses wurde für den Orts- und Regionalverkehr (OV, RPV) unterschiedlich angesetzt mit der Überlegung, dass die Umstellung im Ortsverkehr schneller verlaufen wird als im RPV, weil im Orts- bzw. Agglomerationsverkehr aufgrund kürzerer Linien, i.d.R. wenig anspruchsvoller Topografie und teilweise bereits bestehender Oberleitungsinfrastruktur bessere Voraussetzungen bestehen. Die folgende Grafik zeigt, welche Annahmen bei diesem sog. Szenario «realistisch» in Bezug auf die Anteile, welche bei den anstehenden Busersatzbeschaffungen durch Batteriebusse ersetzt werden, unterstellt sind. Beim Ortsverkehr gehen wir bereits kurzfristig von Anteilen zwischen 25% bis 50% aus, beim RPV von 10% bis 30%. Bei diesem Szenario werden v.a. grössere Transportunternehmen, welche bereits Pilotversuche mit Batteriebussen durchführen und E-Bus-Strategien formuliert haben, aber auch kleinere, innovative TUs mitziehen. Beim Ortsverkehr werden demnach ab ca. 2030 sämtliche Ersatzbeschaffungen durch Batteriebusse erfolgen, beim Regionalverkehr zwei Jahre später ca. im Jahr 2032.

Abbildung Z-1: Anteil Batteriebusse an den neu zu beschaffenden Fahrzeugen für das Szenario «realistisch»



Lesebeispiel: Im Jahr 2023 werden von den Bussen im RPV, welche neu zu beschaffen sind, 10% durch Batteriebusse und 90% durch konventionelle Diesel- oder Diesel-Hybridbusse ersetzt. Dieser Anteil nimmt von Jahr zu Jahr zu. Ab dem Jahr 2032 werden jeweils sämtliche neu zu beschaffenden Busse durch Batteriebusse ersetzt. Im Ortsverkehr werden im Jahr 2023 bereits 25% der neu zu beschaffenden Busse durch Batteriebusse ersetzt. Der Zeitpunkt, ab welchem jeweils sämtliche Fahrzeuge durch Batteriebusse ersetzt werden, liegt bereits im Jahr 2030.

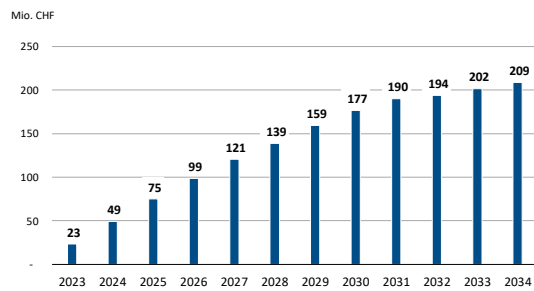
Grafik INFRAS. Quelle: Eigene Annahmen

Zwischen 2023 und 2034 wären folglich im RPV rund 1'900 Fahrzeuge oder rund 50%, im Ortsverkehr knapp 1'300 Fahrzeuge oder rund 70% der Gesamtflotte zu ersetzen. Die folgende Abbildung Z-2 zeigt die für den Regionalverkehr und den Ortsverkehr resultierenden Mehrkosten für die TU für die beiden Szenarien «maximal» und «realistisch» unter den aktuellen Rahmenbedingungen mit Mineralölsteuer-Rückerstattung. Bei den Elektrobussen ist dabei eine Lebensdauer der Fahrzeuge von 12 Jahren (wie bei Dieselbussen) und einer Lebensdauer der Batterien von 6 Jahren unterstellt. Für die Gelegenheitsladerbusse mit mehreren Ladezyklen pro Tag sind die 6 Jahre Batteriebensdauer realistisch angesetzt. Für die Depotladerbusse mit grossen Batterien und i.d.R. *einem* Ladezyklus pro Tag handelt es sich hingegen um eine konservative Annahme; bei diesen Bussen ist eine Batteriebensdauer von gegen 12 Jahren durchaus realistisch. Längere Lebensdauern bei Elektrofahrzeugen und Batterien verringern grundsätzlich die Mehrkosten gegenüber Dieselbussen.

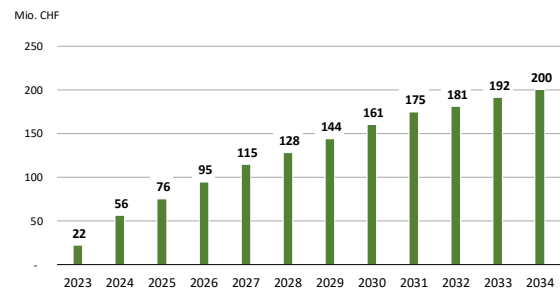
Abbildung Z-2: Jährliche Mehrkosten bei Umstellung von Dieselbussen auf Batteriebusse (Grobschätzung)

Regionalverkehr (RPV)

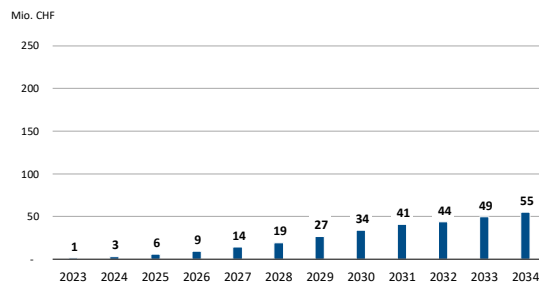
Szenario «maximal»

**Ortsverkehr**

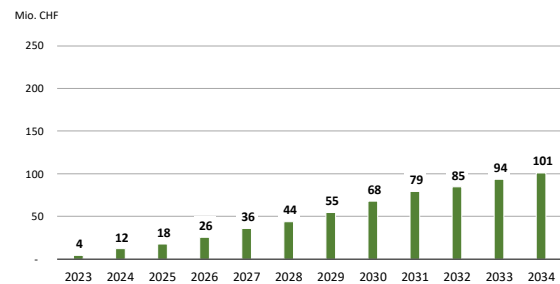
Szenario «maximal»



Szenario «realistisch»



Szenario «realistisch»



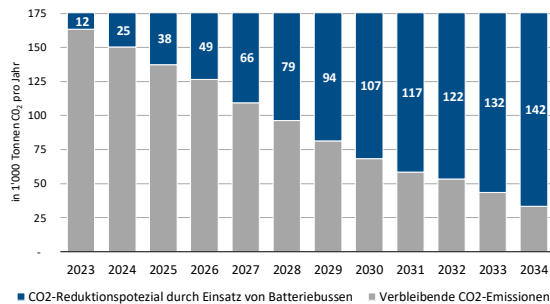
Grafik INFRAS.

CO₂-Reduktionspotenzial mit Batteriebusen

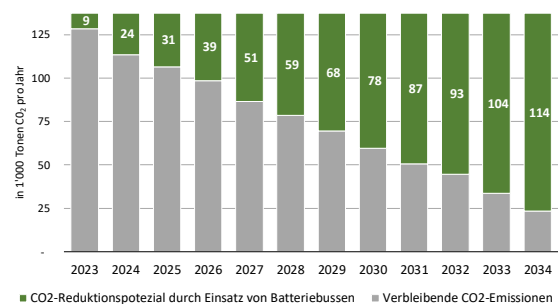
Abbildung Z-3 zeigt das CO₂-Reduktionspotenzial im Regional- und Ortsverkehr für die beiden Szenarien. Im Szenario «maximal» beträgt dieses im Jahre 2034, wenn sämtliche Dieselbusse auf Batteriebusse umgestellt sind, ein Reduktionspotenzial von 80–85%. Beim Szenario «realistisch» liegt im Regionalverkehr das Reduktionspotenzial im Jahr 2034, wenn rund die Hälfte der Dieselbusse auf fossilfreie Busse umgestellt sind, bei 40–45%. Im Ortsverkehr sind im Jahr 2034 rund 70% der Dieselbusse auf Batteriebusse umgestellt. Das entsprechende CO₂-Reduktionspotenzial liegt in der Grössenordnung von 60%.

Abbildung Z-3: CO₂-Reduktionspotenzial einer Umstellung von Dieselnissen auf Batteriebusse**Regionalverkehr (RPV)**CO₂-Emissionen 2019 aller Dieselnisse: 175'000 t/a

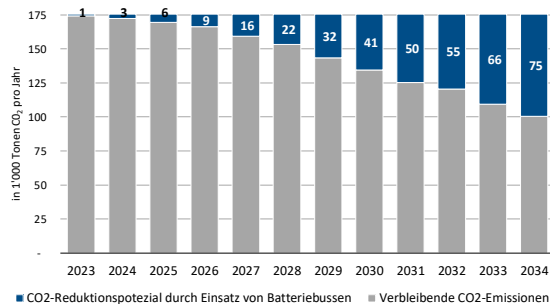
Szenario «maximal»

**Ortsverkehr**CO₂-Emissionen 2019 aller Dieselnisse: 135'000 t/a

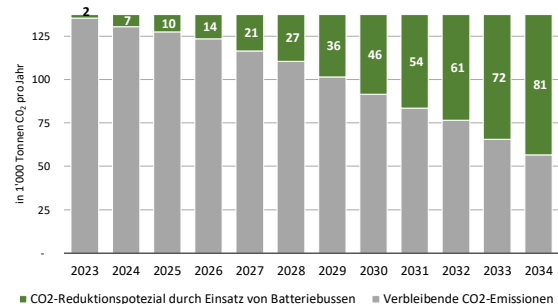
Szenario «maximal»



Szenario «realistisch»



Szenario «realistisch»



Grafik INFRAS.

Regulatorische Rahmenbedingungen, ÖV-Finanzierung und Förderinstrumente

Zusätzlich zur (ordentlichen) Finanzierung und Bestellung des Orts- und Regionalverkehrs durch Bund, Kantone und Gemeinden spielen bestehende Fördermassnahmen aktuell eine eher untergeordnete Rolle. Sie fokussieren v.a. auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge (Tabelle Z-1). Biodiesel- und Biogas-Busse werden heute v.a. im Rahmen der ÖV-Bestellung finanziert. Neuartige Lösungen und Innovationen im Sinne der F&E sowie Innovationen im ÖV (BAV) und des P-D-L-Programms (BFE) sind im Hinblick auf die Marktdurchdringung nicht relevant. Das Programm für den Agglomerationsverkehr (ARE) finanziert v.a. infrastrukturseitige Massnahmen und nur in Ausnahmefällen die Beschaffung von Fahrzeugen. Das Instrument CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure mit dem Kompensationsprojekt «Elektro- und Hybridbusse» ist das einzige ergänzende Instrument bzw. Programm auf nationaler Ebene, welches zusätzlich zur ÖV-Finanzierung die Mehrkosten von fossilfreien oder -armen Fahrzeugen finanziell fördert, wobei die Zusätzlichkeit erfüllt sein muss und sich die TU die CO₂-Kompensation nicht anrechnen lassen können.

Zuständigkeiten, Förderumfang und Geltungsbereich variieren bei den bestehenden Finanzierungsmöglichkeiten und Fördermassnahmen. Auch die Prozesse folgen unterschiedlichen Gesetzmässigkeiten. Die ordentliche ÖV-Finanzierung und das das Programm für den Agglomerationsverkehr (PAV) sind regelmässig laufende Prozesse, wobei diese i.d.R. alle zwei bzw. vier Jahre beginnen. In der ordentlichen ÖV-Finanzierung sind alle drei Ebenen der Gebietskörperschaften involviert, wobei den Kantonen eine zentrale Rolle zukommt. Zusätzliche Fördermassnahmen auf kantonaler und kommunaler existieren nur in einzelnen Fällen. Die Situation ist entsprechend komplex.

Tabelle Z-1: Finanzierung bzw. Fördermöglichkeiten von Fahrzeugen und Antriebstechnologien

	E-Depotla- der	E-Gelegen- heitslader	Batterie- Trolleybus	E-Bus mit Brenn- stoffzelle	Biodiesel- Bus	Biogas-Bus
Ordentliche ÖV-Finanzierung	■					
F&E sowie Innovationen im ÖV aus RPV-Kredit (ab 2022)*	■					
P-D-L-Programm*	■					
Programm Agglomerationsver- kehr (PAV)**	■					
CO ₂ -Kompensationspflicht Treibstoffimporteure, mycli- mate Kompensationsprojekt «Elektro- und Hybridbusse»	■					
Kommunale Förderung Fahr- zeug + Ladeinfrastruktur (Bsp. Stromsparmögens/ewz)	■					

* Es werden zwar keine Antriebstechnologien ausgeschlossen, die Fördermöglichkeiten haben jedoch an Bedeutung verloren (fehlender Innovationscharakter von neuen Investitionen).

** Mitfinanzierung von Oberleitungen, Ladestationen und Mehrkosten für die Beschaffung von Fahrzeugen (v.a. E-Fahrzeuge als Gelegenheits-/Depotlader), sofern diese zu Einsparungen der Infrastrukturkosten für Oberleitungen für Trolleybusse führen, möglich (Art. 17a Abs. 2^{bis} MinVG).

Tabelle INFRAS.

Da der ÖV öffentlich bestellt und finanziert wird, stellt sich die grundsätzliche Frage, inwiefern es zusätzliche Fördermassnahmen braucht oder ob im Rahmen des Bestellprozesses (und auch im Rahmen der strategischen Zielsetzungen der i.d.R. öffentlichen Unternehmen) die Umstellung auf bzw. Durchdringung mit fossilfreien Fahrzeugen im ÖV gefördert werden kann. Den Kantonen, welche die RPV-Bestellung koordinieren und oft im Ortsverkehr mitfinanzieren, kommt eine zentrale Rolle zu. Kantonale Strategien und Konzepte für einen fossilfreien, energieeffizienten ÖV können die Durchdringung fördern. Gleichzeitig müssen hierfür aber auch die

entsprechenden finanziellen Mittel seitens Bund, Kantonen und Gemeinden zur Verfügung stehen.

Rund ein Drittel der Kantone hat aktuell eine Strategie für einen fossilfreien, energieeffizienten ÖV. In zwei Kantonen ist eine Strategie in Vorbereitung. In fast allen Kantonen können die Mehrkosten für fossilfreie, energieeffiziente Busse im Rahmen der ordentlichen ÖV-Finanzierung grundsätzlich finanziert werden oder werden bereits mitfinanziert. Inwieweit hierfür die notwendigen finanziellen Mittel künftig zur Verfügung stehen, kann nicht beurteilt werden und war nicht Gegenstand der Studie. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die jeweilige finanzielle Situation in den Kantonen und Gemeinden sehr unterschiedlich ist.

Das RPV-Bestellverfahren und das Qualitätsmesssystem im RPV (als Basis für Zielvereinbarungen) berücksichtigt heute keine Umweltziele. Vorgaben zur Beschaffung – wie dies der Europäische Rechtsrahmen (Clean Vehicle Directive) vorsieht – gibt es im RPV nicht. Neu wird jedoch die Beschaffung von alternativ angetriebenen Bussen im RPV vorab zu genehmigen sein. Auf kantonaler Ebene gibt es vereinzelt Beschaffungsvorgaben (z.B. im ÖV-Gesetz von Basel-Stadt). Generell ist die Zusätzlichkeit (Additionalität) von Fördermassnahmen und ÖV-Finanzierung zu beachten. Werden Vorgaben betreffend der Umweltstandards der zu beschaffenden Busse seitens der Besteller gemacht, kann die Zusätzlichkeit im Rahmen von Kompensationsprojekten wie das Programm «Hybrid- und Elektrobuss» des Instruments der CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure nicht mehr als nachgewiesen gelten. Dieses nationale Förderinstrument könnte entsprechend an Bedeutung verlieren.

Mit der Mineralölsteuerrückerstattung für KTU als indirekte Finanzhilfe besteht gleichzeitig ein bedeutender Fehlanreiz im Hinblick auf die Umstellung auf fossilfreie Busse. Die Rückerstattungen an KTU machen heute durchschnittlich rund 70 Mio. CHF pro Jahr aus.

Folgerungen zum Potenzial für Batteriebusse und Mehrkosten

Eine kurzfristige vollständige Umstellung der Dieselflotte auf Batteriebusse wäre zwar rein technisch möglich, ist jedoch angesichts des technologischen Stands weder im Orts- noch im Regionalverkehr aus wirtschaftlicher Sicht zweckmässig und sinnvoll. Die Batteriebusse sind unter den heutigen Rahmenbedingungen noch vergleichsweise teuer. Und die Depotlader lösen wegen noch ungenügender Reichweiten einen höheren Fahrzeugbedarf mit entsprechenden Folgekosten aus. Weil davon auszugehen ist, dass die verfügbaren Finanzmittel von Bund, Kantonen und Gemeinden für den öffentlichen Verkehr beschränkt sind, geht es v.a. kurz-/mittelfristig auch um eine Umweltnutzenoptimierung zwischen Angebotsausbau (mit dem Ziel, die Verlagerung von privatem Personenverkehr auf den öffentlichen Verkehr weiter zu fördern) und dem Einsatz von Elektrobussen. Die Investition in eine Umstellung auf Elektrobusse darf

nicht dazu führen, dass die bestehenden ÖV-Angebote (oder Angebotsausbauten) karnibaliert werden. Die investierten Mittel müssen folglich zusätzlich zur bestehenden Finanzierung des öffentlichen Verkehrs eingesetzt werden.

Mit dem skizzierten «realistischen» Szenario, welches dieser Nutzenoptimierungsüberlegung Rechnung trägt, liessen sich im Zeitraum 2023 und 2034 im RPV rund 50% der heutigen Dieselbusse oder ca. 1'900 Fahrzeuge durch Batteriebusse ersetzen. Im Ortsverkehr könnten im selben Zeitraum rund 70% oder 1'300 Fahrzeuge auf fossilfreie Elektrobusse umgestellt werden.

Die Mehrkosten gegenüber den Dieselbussen im «realistischen» Szenario bewegen sich im RPV kurzfristig in einer Grössenordnung bis 20 Mio. CHF pro Jahr und steigen bis ins Jahr 2030 auf rund 40–50 Mio. CHF pro Jahr weiter an, unter der Annahme, dass die Mineralölsteuerrückerstattung für die Dieselbusse weiterhin stattfindet.

Die Mehrkosten im Ortsverkehr im «realistischen» Szenario bewegen sich kurzfristig zwischen 10 und 40 Mio. CHF pro Jahr und steigen bis 2030 gegen 100 Mio. CHF pro Jahr an, sofern weiterhin die Mineralölsteuerrückerstattung gilt.

Folgerungen zum Finanzierungsbedarf und Förderinstrumente

Werden die Mehrkosten der Batteriebusse gegenüber den Dieselbussen (Referenz) mit und ohne Mineralölsteuerrückerstattung für KTU ausgewiesen, so zeigt sich eine grosse Differenz. Die Mineralölsteuerrückerstattung für KTU ist eine indirekte Finanzhilfe für fossilbetriebene Fahrzeuge und stellt aus klimapolitischer Sicht einen finanziell bedeutsamen Fehlanreiz dar. Eine Aufhebung der Mineralölsteuerrückerstattung würde bei gleichbleibenden ÖV-Tarifen und gleichbleibendem Angebot den finanziellen Bedarf aus Sicht der TU und der ÖV-Besteller (Bund, Kantone, Gemeinden) zunächst erhöhen, setzt aber Anreize für eine beschleunigte Durchdringung, da die Aufhebung der Mineralölsteuerrückerstattung die Kostendifferenz eines Batteriebusse gegenüber einem Dieselbus deutlich reduzieren würde.

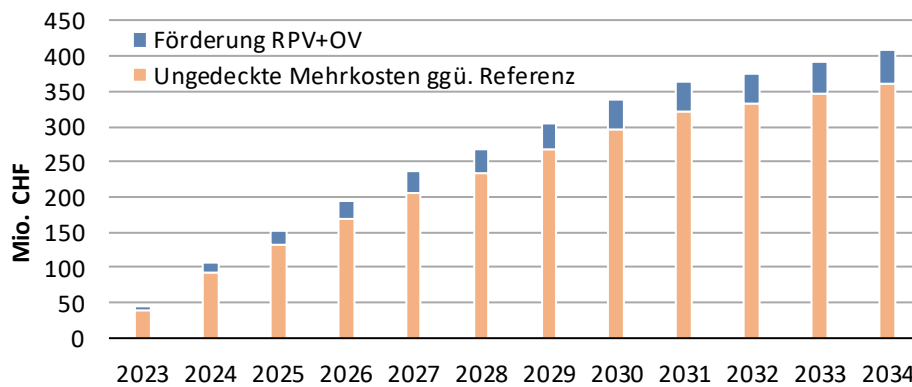
Soll die Marktdurchdringung von Batteriebussen entsprechend dem realistischen Szenario erfolgen, sind die finanziellen Mittel der KTU zu erhöhen, insbesondere dann, wenn die Mineralölsteuerrückerstattung bestehen bleibt und dadurch die Referenztechnologie Dieselbus weiterhin begünstigt wird. Die KTU könnten zur Finanzierung der Mehrkosten die Tarife und damit die Einnahmen erhöhen. Tariferhöhungen können jedoch unerwünschte modale Verlagerungen zur Folge haben. Klima- und verkehrspolitisch ist dies nicht erwünscht, war jedoch nicht Gegenstand dieser Studie bzw. des Postulats.

Die bestehenden nationalen Förderinstrumente (CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure sowie Mittel aus dem Programm für den Agglomerationsverkehr PAV) können bisher einen verhältnismässig kleinen Teil des zusätzlichen Finanzierungsbedarfs decken (Abbildung Z-

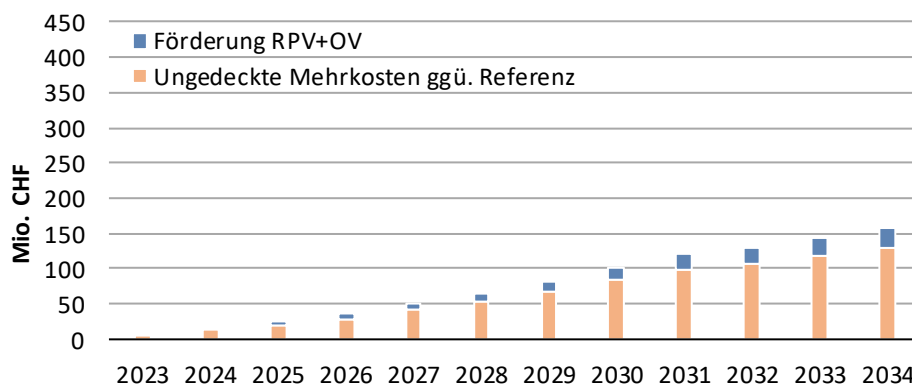
4). Hierbei sind Wechselwirkungen zwischen den Förderprogramm und der ordentlichen ÖV-Finanzierung durch Bund, Kantone und Gemeinden zu berücksichtigen. Das Instrument CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure fördert die Umstellung auf Hybrid- und Elektrobusse, wenn diese nicht ohnehin vorgegeben ist (z.B. aufgrund gesetzlicher Vorgaben). Bundesbeiträge aus dem PAV werden beispielsweise nur an Massnahmen gezahlt, die nicht ohnehin vom Bund mitfinanziert werden (z.B. Ortsverkehr).

Abbildung Z-4: Entwicklung der durch Förderbeiträge gedeckten sowie ungedeckten Mehrkosten (myclimate/Kliik + PAV) für RPV+OV (inkl. Mineralölsteuerrückerstattung KTU)

Szenario «maximal»



Szenario «realistisch»



KTU: Konzessionierte Transportunternehmen, OV: Ortsverkehr, PAV: Programm Agglomerationsverkehr, RPV: Regionaler Personenverkehr

Grafik INFRAS. Quelle: eigene Schätzungen.

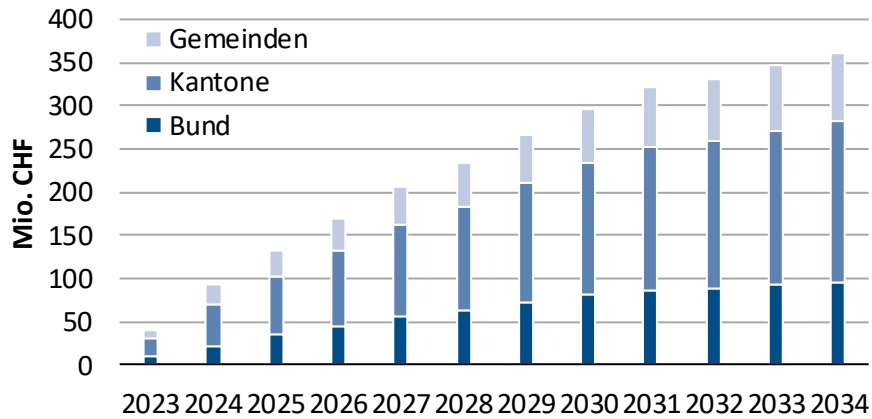
Würde die Finanzierung der ungedeckten Mehrkosten über die ordentliche ÖV-Finanzierung und Bestellung gemäss der heutigen Aufteilung (Bund, Kantone, Gemeinden) erfolgen, würden insbesondere die Kantone zusätzlich finanziell belastet, da sie sowohl den RPV als auch den

Ortsverkehr mitfinanzieren (Abbildung Z-5). Im realistischen Szenario und unter Berücksichtigung der heutigen Mineralölsteuerrückerstattung würde dies für den Zeitraum 2023–2034 kumulativ ein finanzieller Mehrbedarf von rund 125 Mio. Franken für den Bund, 395 Mio. Franken für die Kantone und rund 240 Mio. Franken für die Gemeinden bedeuten.

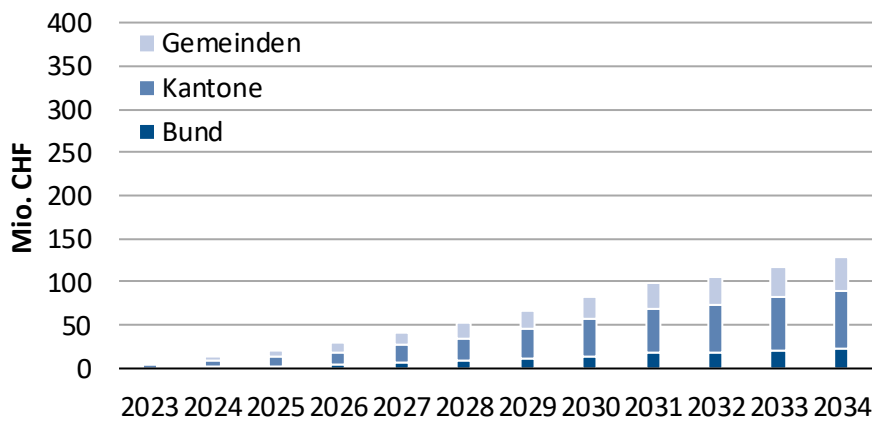
Der Wegfall der Mineralölsteuer würde zwar die Kostendifferenz von Dieselnissen zu fossilfreien Bussen minimieren, für den ungedeckten Finanzierungsbedarf aus Sicht der ordentlichen ÖV-Finanzierung hat dies jedoch keinen direkten Einfluss. Die Mehrkosten für Dieselnisse aufgrund des Wegfalls der Mineralölsteuerrückerstattung würde ebenfalls zu einem Anstieg des ungedeckten Finanzierungsbedarfs führen. Die höheren Einnahmen aus der Mineralölsteuer (inkl. Zuschlag) des Bundes sind mehrheitlich zweckgebunden und würden nicht automatisch zu einer Erhöhung der Bundesmittel für den RPV führen. Kantone und Gemeinden erhielten keine zusätzlichen Einnahmen zur Deckung von Mehrkosten im ÖV. Aufgrund der aktuellen Situation (Einnahmefälle aufgrund Corona) stellt sich die Frage, ob die zusätzlichen finanziellen Mittel insbesondere ab 2024 zur Verfügung gestellt werden können, um die geschätzten Mehrkosten zu finanzieren.

Abbildung Z-5: Mögliche Aufteilung Finanzierungsbedarf gemäss der ordentlichen ÖV-Finanzierung (RPV+OV), inkl. Mineralölsteuerrückerstattung

Szenario «maximal»



Szenario «realistisch»



OV: Ortsverkehr, RPV: Regionaler Personenverkehr

Grafik INFRAS. Quelle: eigene Schätzungen.

Zusätzliche Fördermöglichkeiten des Bundes können die Marktdurchdringung erhöhen. Dabei sollten sich die Förderbeiträge an den Investitionsmehrkosten als auch den Kosten pro reduzierter Tonne CO₂ orientieren. Ob und welche zusätzlichen Finanzierungsinstrumente aus Sicht des Bundes geeignet sind, ist letztendlich ein politischer Entscheidung und entsprechend Teil des auf der Grundlagenstudie basierenden Postulatsberichts.

Résumé

Mandat, méthodologie

Les moteurs sans carburant fossile permettent de rendre les transports publics par bus plus écologiques. Actuellement, les transports publics suisses comptent une flotte de quelque 5'500 bus, dont deux tiers desservent des lignes régionales et un tiers des lignes locales. Toutefois, les surcoûts, dont certains sont élevés aujourd'hui par rapport aux bus diesel, rendent plus difficile le passage à des systèmes de conduite plus respectueux de l'environnement. Sous l'angle de la politique énergétique et climatique, l'encouragement des moyens de transports publics qui se passent de carburants fossiles est à saluer; en accélérant le remplacement des bus diesel, les transports publics donnent l'exemple. Toutefois, il est actuellement impossible de chiffrer de manière fiable tant les coûts que l'efficacité d'une telle transition. Il convient donc dans un premier temps de produire des données de base pertinentes qui permettent d'évaluer les possibilités d'utilisation de bus équipés de moteurs sans carburant fossile et du potentiel de réduction des émissions de CO₂; ces chiffres servent de base au présent rapport relatif au postulat 19.3000 *Encourager le passage des véhicules de transport public aux énergies propres*.

La présente étude présente les options en matière de moteurs sans carburant fossile dans le domaine des transports publics (TP) par bus; elle se fonde sur l'état actuel des connaissances techniques et présente leurs coûts ainsi que les avantages qu'ils représentent pour l'environnement. Ces données permettent de calculer le surcoût actuel et futur de tels bus par rapport aux bus diesel. L'étude présente également les mécanismes de financement du surcoût des offres de TP commandées dans les conditions actuelles et en tenant compte des instruments de financement potentiels. Les ressources financières requises pour une meilleure promotion des moteurs sans carburant fossile ont été calculées sur la base de ces données. Rappelons que les bus diesel sont aujourd'hui responsables de 2 pour cent du CO₂ émis par les transports en Suisse. Les éventuels mécanismes de financement doivent par conséquent être simples et efficaces.

Quels types de moteurs sans carburant fossile pour les transports publics par bus ?

Une analyse d'impact placée sous la devise « sans énergie fossile » a comparé les performances des bus électriques et des bus à moteur à combustion alimentés par des biocarburants (diesel bio, biogaz) à celles des bus diesel conventionnels de type Euro 6. L'analyse des bus électriques

portait sur des modèles à batterie avec différents modes de chargement² et sur des bus équipés d'une pile à combustible.

Du point de vue écologique, les bus à batterie l'emportent largement, tant en termes d'émissions de gaz à effet de serre qu'en termes de consommation d'énergie primaire, de concentration de polluants atmosphériques au niveau local et d'émissions de bruit sur les trajets parcourus. En termes d'émissions, la concentration de polluants atmosphériques émise par le trafic local et régional est comparable ; toutefois, le nombre de personnes concernées par les polluants émis par les transports locaux est plus important.

Le bilan du bus équipé d'une pile à combustible alimentée à l'hydrogène est comparable à celui du bus à batterie pour ce qui est des émissions de gaz à effet de serre et de la concentration de polluants émis au niveau local ; il présente toutefois une consommation d'énergie primaire très élevée, car la fabrication d'hydrogène est énergivore et de plus, la transformation d'hydrogène en courant électrique à l'intérieur de la pile s'accompagne de pertes d'énergie massives.

En comparaison avec les bus diesel, la construction des bus à batterie nécessite davantage de matières premières problématiques, notamment du lithium, du cobalt, du graphite ainsi que des terres rares ; les trois premiers entrent dans la composition des piles alors que les terres rares sont utilisées dans les moteurs électriques. Les processus de recyclage actuels permettent de réutiliser la quasi-totalité de ces matières. La valeur de ces matières premières est telle qu'on peut admettre qu'un tel recyclage aura réellement lieu au terme de la durée de vie des piles utilisées dans les bus. Toutefois, l'augmentation du nombre des véhicules à batterie et plus particulièrement des voitures de tourisme risque de provoquer une augmentation telle de la demande de ces matières premières problématiques qu'on risque une pénurie. Ces matières premières étant substituables dans les véhicules électriques, des options existent pour contourner leur rareté.

La consommation d'énergie primaire des biocarburants est moins élevée que celle des bus électriques, car l'énergie des déchets qui sont à l'origine de ces biocarburants n'est pas prise en compte dans le présent écobilan en raison d'une décision méthodologique. Toutefois, le potentiel de réduction des gaz à effet de serre (biogaz) est inférieur à celui des bus électriques et leur taux d'émission de bruit et de polluants au niveau local n'est guère moins élevé que celui des bus diesel (biogaz et biodiesel).

² Bus chargés au dépôt : équipés de batteries à forte capacité, à charger de nuit au dépôt

Bus alimentés par biberonnage : équipés de petites batteries, chargés à l'arrêt pendant quelques minutes, typiquement au terminus.

Trolleybus à batterie: partiellement entraînés par le courant des caténaires et qui chargent en même temps une batterie qui permet de se déplacer sans caténaire.

Au niveau des coûts, il convient de faire une distinction entre les évolutions à court terme et celles à moyen terme ainsi que de prendre en compte les facteurs qui ont impact sur le coût et qui dépendent en partie du cadre réglementaire (p. ex. remboursement de l'impôt sur les huiles minérales). Dans les conditions qui prévalent actuellement, les bus à batterie restent relativement coûteux et leur potentiel d'utilisation est limité (notamment pour les véhicules qui se chargent uniquement au dépôt et qui ont une autonomie insuffisante par charge). À moyen et à long terme, les bus à batterie pourraient bien devenir la variante la moins coûteuse en cas d'utilisation appropriée et de mise au point de batteries à durée de vie plus longue. La suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales, qui favorise aujourd'hui les bus diesel, permettrait, elle aussi, de favoriser les bus à batterie.

À court terme, ce sont les bus à biocarburants qui présentent la solution la plus avantageuse économiquement. Il faut toutefois se demander s'il est judicieux d'opter en faveur de cette solution durant la période de transition nécessaire aux bus à batterie pour déployer tout leur potentiel. Les biocarburants nécessitent l'installation de stations-service de biogaz et de biodiesel, l'adaptation des ateliers d'entretien ainsi qu'une reconversion du personnel pour cette technologie de transition. Leur disponibilité limitée, surtout en Suisse, représente autre argument en défaveur des biocarburants. Le biodiesel suisse fabriqué à partir d'huiles de cuisson usagées ne suffit pas à alimenter toute la flotte des bus de TP en Suisse ; il représente une option pour des lignes isolées. Il faut donc aussi se demander si, au-delà de l'utilisation dans les TP, il serait judicieux de miser sur les biocarburants dans les domaines où les carburants de rechange, qui permettraient de réduire les émissions de gaz à effet de serre, manquent encore, comme par exemple dans le cas des transports routiers de marchandises à longue distance, de la navigation maritime et des transports aériens. Cette question se pose aussi pour les bus hybrides plug-in à biocarburants.

Le bilan financier et écologique montre qu'à court et à moyen terme et dans des contextes d'exploitation appropriés, les bus électriques constituent la solution de rechange sans carburant fossile à privilégier par rapport aux bus diesel d'un point de vue économique. À long terme, le développement technique escompté des bus à batterie permettra une multiplication des utilisations judicieuses et économiques des bus électriques en trafic tant régional que local, abaissant les coûts encore relativement élevés, à court terme, de lutte contre le CO₂ des bus électriques au-dessous de 200 francs par tonne de CO₂. La suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales permettrait pratiquement de ramener à zéro la différence de coûts entre les bus électriques et les bus Diesel sous réserve de conditions d'exploitation idéales. Les coûts liés à la lutte contre les émissions de CO₂ restent élevés, à court terme du moins. Il faut se rappeler à cet égard que les bus électriques, contrairement aux bus à bio-

carburants, contribuent à réduire les coûts externes tiers liés au bruit et aux polluants atmosphériques, dont le coût total est trois fois plus élevé que les coûts externes liés à la lutte contre le réchauffement climatique (INFRAS & Ecoplan 2019). Les surcoûts doivent donc tenir compte de tous les facteurs en jeu et non seulement de la réduction du CO₂.

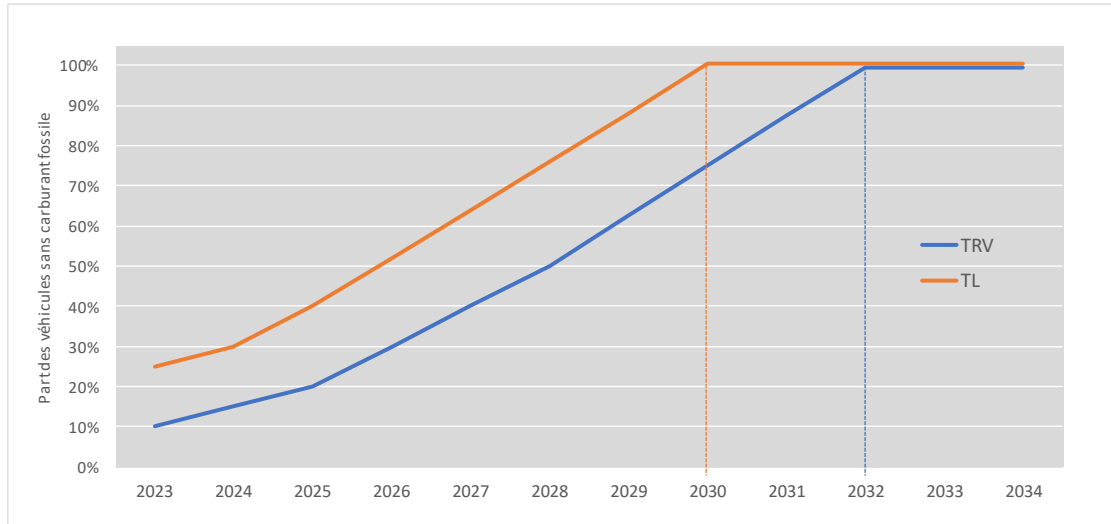
Le choix du type de bus électrique dépend des conditions spécifiques de la ligne ou du réseau considéré : à batterie, à charger au dépôt, à chargement par biberonnage statique ou encore équipé d'une pile à combustible si une autonomie journalière de 400 à 500 kilomètres est requise. La présente étude exclut les situations particulières.

Le potentiel des bus à batterie et les coûts supplémentaires

Techniquement, il est parfaitement envisageable de remplacer tout véhicule conventionnel par un bus sans consommation d'énergie fossile, une option que nous désignerons par l'appellation « scénario maximal ». Toutefois, les bus à batterie restent une option relativement coûteuse et à court terme, des contraintes économiques freinent donc l'achat de tels véhicules : d'une part, tant le véhicule lui-même que les batteries coûtent cher sur le marché ; d'autre part, la faible autonomie des bus chargés au dépôt ou le temps d'attente trop court au terminus pour recharger les bus par biberonnage nécessitent l'acquisition d'un nombre plus grand de véhicules en comparaison avec des bus diesel.

Le surcoût, le délai d'acquisition plus long des véhicules, la mise en place des infrastructures de charge et la formation du personnel : autant de facteurs qui, cumulés, rendent peu réaliste et judicieux le remplacement systématique des bus diesel par des bus à batterie durant les années à venir. En nous appuyant sur les stratégies des entreprises de transport (ET) en matière de bus électriques, nous avons donc élaboré un scénario « réaliste » de conversion aux bus à batterie, avec des variantes pour le trafic local et le trafic régional (TL, TRV) qui tiennent compte du fait que la conversion pourra se faire plus aisément dans le cas du TL que du TRV : généralement, en trafic local, les lignes sont plus courtes, la topographie est moins exigeante et souvent, des caténaires existent déjà pour les trolleybus. Le graphique ci-après présente les hypothèses jugées réalistes en termes de remplacement de bus existants par des bus à batterie. À court terme, nous nous basons sur un taux de remplacement de 25 à 50 pour cent dans le trafic local et de 10 et 30 pour cent en trafic régional. Ce scénario vise avant tout les grandes entreprises de transport, qui disposent déjà d'une stratégie d'acquisition de bus électriques et qui en font rouler dans des projets pilotes ; il vise également les entreprises plus petites, mais innovantes. Selon notre hypothèse, la totalité des bus de TL remplacés à partir de 2030 le sera par des bus à batterie ; ce sera également le cas des entreprises de TRV à partir de 2032 environ.

Fig. Z-1: La part de bus à batterie lors de l'acquisition de nouveaux véhicules (scénario « réaliste »)



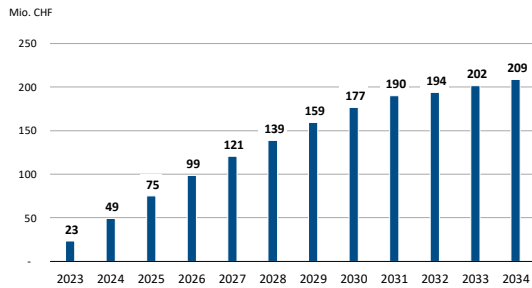
Exemple : en 2023, 10 pour cent des bus acquis pour le trafic régional seront à batterie et 90 pour cent des véhicules conventionnels à diesel ou hybride diesel-électrique. Cette proportion changera progressivement pour atteindre, en 2032, 100 pour cent de nouvelles acquisitions à batterie. En trafic local, 25 pour cent des bus remplacés seront à batterie et en 2030, ce sera le cas de la totalité des remplacements.

Graphique : INFRAS. Source : hypothèses INFRAS.

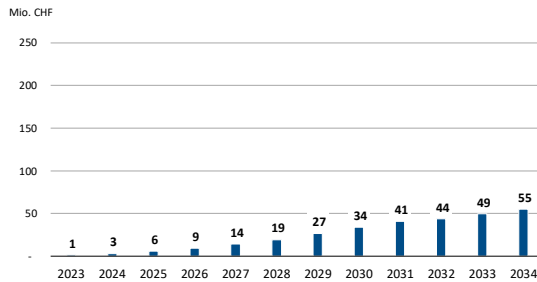
Selon le graphique ci-dessus, quelque 1'900 véhicules, c'est-à-dire la moitié de la flotte de TRV, sera remplacée tout comme quelque 1'300 véhicules ou 70 pour cent de la flotte de TL. Le graphique Z-2 ci-après illustre le coût supplémentaire encouru par les entreprises de transport de TRV et de TL dans le cas des scénarios « maximal » et « réaliste » compte tenu du cadre réglementaire en place, qui comprend le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales. L'hypothèse se base sur un cycle de vie de douze ans pour les bus électriques (comme pour les bus diesel) et de six ans pour les batteries ; cette durée de six ans pour les batteries des bus alimentés par biberonnage, avec plusieurs cycles de chargement par jour, est réaliste. Dans le cas des bus chargés au dépôt, équipés de grosses batteries chargées durant la nuit, cette hypothèse est prudente ; un cycle de vie de douze ans est parfaitement réaliste. Des cycles de vie plus longs des bus électriques et des batteries réduisent le surcoût par rapport aux bus diesel.

Figure Z-2 : surcoût annuel de la conversion aux bus à batterie (estimation sommaire)

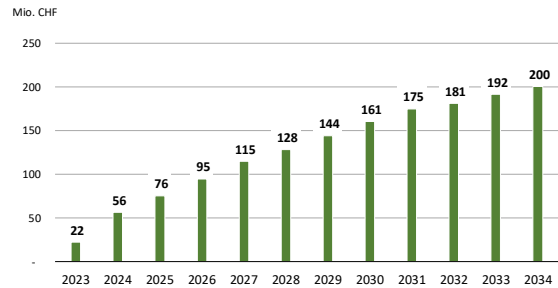
Trafic régional (TRV) Scénario « maximal »



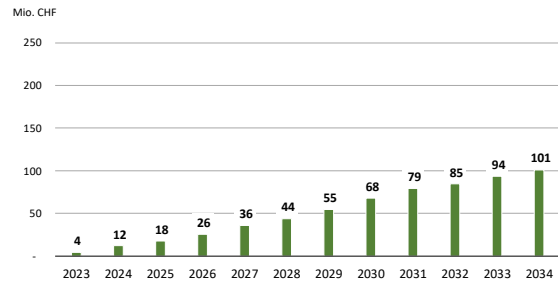
Scénario « réaliste »



Trafic local (TL) Scénario « maximal »



Scénario « réaliste »



Graphique : INFRAS.

Le potentiel de réduction des émissions de CO₂ des bus à batterie

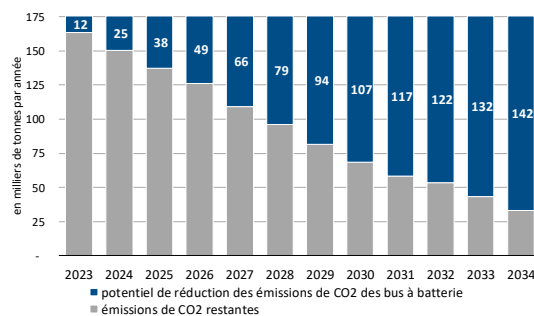
La figure Z-3 montre le potentiel de réduction des émissions de CO₂ en trafic local et régional. Dans le cas du scénario « maximal », ce potentiel est de 80 à 85 pour cent d'ici à 2034, après le remplacement de tous les bus diesel par des bus à batterie. Le scénario « réaliste » prévoit un potentiel de réduction de 40 à 45 pour cent d'ici à 2034, après remplacement de la moitié de la flotte diesel par des bus sans carburant fossile dans le trafic régional ; ce potentiel est de 60 pour cent dans le trafic local, après remplacement de 70 pour cent des bus diesel.

Figure Z-3: potentiel de réduction des émissions de CO₂ après remplacement des bus diesel par des bus à batterie

Trafic régional (TRV)

Émissions de CO₂ de tous les bus diesel en 2019 :
175'000 t/a

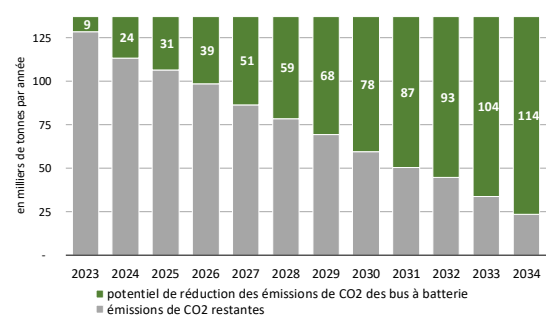
Scénario « maximal »



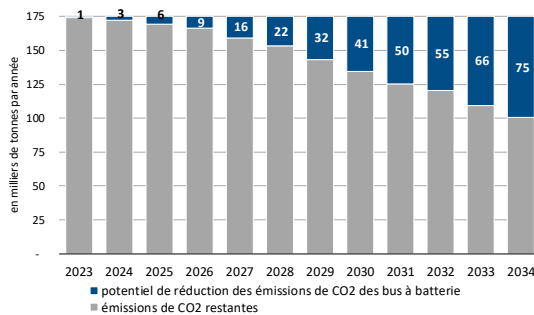
Trafic local (TL)

Émissions de CO₂ de tous les bus diesel en 2019 :
135'000 t/a

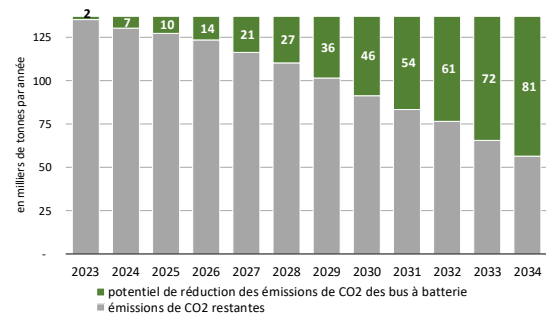
Scénario « maximal »



Scénario « réaliste »



Scénario « réaliste »



Graphique : INFRAS.

Cadre réglementaire, financement des TP, instruments de financement

Actuellement, le financement des transports locaux et régionaux est essentiellement assuré par les commanditaires, soit la Confédération, les cantons et les communes. Les instruments de financement complémentaires jouent un rôle mineur et se concentrent sur les véhicules électriques (cf. tableau no 21). Les bus à biocarburants ou à biogaz sont avant tout financés par le biais des commandes par les entreprises de TP. Les innovations proposées qui découlent de la recherche et du développement et celles qui sont proposées dans le domaine des TP (OFT) et du programme P+D+L (OFEN) n'ont pas d'impact sur le marché. Le programme en faveur du trafic d'agglomération (ARE) finance avant tout les mesures qui touchent l'infrastructure et seulement à titre exceptionnel l'acquisition de véhicules. L'instrument de la compensation des émissions de CO₂ par les importateurs de carburants et son projet « Bus électriques et hybrides » est le seul instrument/programme complémentaire au niveau national qui finance le

surcoût produit par l'utilisation de véhicules sans carburant fossile ou peu gourmands en énergie fossile, pour autant qu'il s'agisse d'une mesure complémentaire ; les ET ne peuvent pas porter à leur crédit la compensation des émissions de CO₂.

Les organes responsables des instruments de financement et des mesures d'encouragement ainsi que le volume des aides et le domaine de validité varient, tout comme la gestion des processus. Le financement ordinaire des TP et le programme en faveur du trafic d'agglomération obéissent à des cycles réguliers, de deux à quatre ans. Le financement ordinaire des TP implique les trois niveaux de l'État, les cantons jouant un rôle central. Les mesures supplémentaires de soutien au niveau cantonal et communal sont rares. La situation est donc complexe.

Tableau Z-1 : instruments de financement ou de promotion de véhicules et de technologies d'entraînement

	Bus électrique chargé au dépôt	Bus électrique chargé par biberonnage	Trolleybus à batterie	Bus à pile à combustion	Bus à bio-diesel	Bus à biogaz
Financement ordinaire des TP						
R&D et innovations TP financés par le crédit TRV (dès 2022)*						
Programme P+D+L*						
Programme trafic d'agglomération**						
Compensation des émissions de CO ₂ par les importateurs de carburants ; projet de compensation <i>myclimate</i> « Bus électriques et hybrides »						
Encouragement véhicules et infrastructure de charge par les communes (p. ex. encouragement véhicules + infrastructure de charge, tels que le fonds d'économies d'électricité [Stromsparfonds] de la Ville de Zurich)						

* Aucun type d'entraînement n'est exclu, mais les possibilités de soutien sont en baisse (caractère non innovateur des nouveaux investissements).

** Possibilité de cofinancement de caténaires, de stations de charge et de surcoûts occasionnés lors de l'achat de véhicules (avant tout véhicules électriques chargés au dépôt et par biberonnage), pour autant que ces surcoûts entraînent une baisse des frais d'infrastructures (caténaires de trolleybus) (art. 17a, al.2^{bis} LUMin).

Tableau : INFRAS.

Les TP étant commandés et financés par les collectivités publiques, il faut se demander si des mesures de soutien supplémentaires sont nécessaires ou si l'adoption systématique des véhicules sans carburants fossiles ne pourrait pas être encouragée dans le cadre du processus de commande ainsi que dans le cadre des objectifs stratégiques des entreprises, généralement publiques. Un rôle essentiel revient, dans ce contexte, aux cantons qui coordonnent la commande de prestations de TRV et qui les cofinancent fréquemment via le TL. Les stratégies et concepts cantonaux pour un système de TP sans fossiles et efficace sur le plan énergétique peuvent favoriser la pénétration. Mais dans le même temps, la Confédération, les cantons et les communes doivent fournir les moyens financiers nécessaires.

Aujourd'hui, un tiers des cantons dispose d'une stratégie en faveur de TP sans carburants fossiles et aux performances énergétiques élevées ; deux cantons supplémentaires préparent une telle stratégie. La quasi-totalité des cantons a la possibilité de cofinancer le surcoût des bus sans carburant fossile et aux performances énergétiques élevées dans le cadre du financement ordinaire des TP ; certains d'entre eux le font déjà. Il n'est pas possible d'anticiper si les ressources financières requises figureront dans les budgets futurs, un aspect qui n'est pas traité dans la présente étude. On peut admettre que la situation financière des différents cantons et communes est très hétérogène.

La procédure actuelle de commande des TRV et le système de mesure de la qualité de TRV (comme base de conventions d'objectifs) ne comprend aucun objectif environnemental ; elle ne connaît aucune prescription en matière d'acquisitions comparable à la réglementation européenne (Clean Vehicle Directive). Seule innovation en vue : désormais, l'acquisition de bus à entraînement non conventionnel pour les TRV est soumise à approbation préalable. Certains cantons connaissent des directives en matière d'acquisition (p. ex. la loi sur les TP de Bâle-Ville). De manière générale, le principe de l'additionnalité des mesures d'encouragement et du financement des TP doit être respecté. Si le mandat émet des critères écologiques pour les bus à acquérir, il n'est plus possible de prouver l'additionnalité dans le cadre de projets de compensation, tels que le programme « Bus hybrides et électriques » de l'instrument de la compensation des émissions de CO₂ par les importateurs de carburants ; par conséquent, cet instrument d'encouragement qui intervient au niveau national pourrait perdre de son importance.

Le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales dont bénéficient les entreprises de transport concessionnaires suisses constitue une aide financière indirecte et une incitation inopportune qui freine la conversion aux énergies non fossiles ; actuellement, ces entreprises se voient en moyenne restituer quelque 70 millions francs chaque année.

Conclusions à propos du potentiel des bus à batterie et de leur surcoût

Techniquement possible à court terme, la conversion de la flotte des bus diesel en flotte de bus à batterie n'est toutefois pas judicieuse compte tenu de l'état d'avancement technique, ni dans le trafic local, ni dans le trafic régional. Les bus à batterie restent relativement coûteux et les modèles à charger au dépôt ont une autonomie relativement faible qui nécessite une multiplication des véhicules et par conséquent des dépenses. En partant de l'hypothèse que les ressources financières que la Confédération, les cantons et les communes affectent aux transports publics sont limitées, il s'agit, à court et à moyen terme, de parvenir à une optimisation écologique, entre développement de l'offre (encouragement du transfert de la mobilité individuelle vers les transports publics) et recours aux bus électriques. Les investissements liés à la conversion aux bus électriques ne doivent en aucun cas conduire à une cannibalisation des offres actuelles ou prévues de TP. Ces investissements doivent se faire en plus des ressources financières allouées aux transports publics.

Le scénario « réaliste » esquissé ci-dessus, basés sur l'utilisation optimale des ressources, prévoit le remplacement de la moitié des bus diesel actuels (env. 1'900 véhicules) qui assureront les TRV entre 2023 et 2034. Durant la même période, quelque 70 pour cent des véhicules qui assurent les TL, soit 1'300 véhicules, pourront être remplacés par des bus électriques.

Dans le scénario « réaliste », le surcoût par rapport aux bus diesel s'élève à 20 millions de francs par année à court terme pour culminer à quelque 40 millions d'ici à 2030, pour autant que le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales soit maintenu pour les bus diesel.

Dans ce même scénario réaliste, ce surcoût est de 10 à 40 millions de francs par année pour les transports locaux et pourra atteindre jusqu'à près de 100 millions de francs vers 2030, toujours en partant de l'hypothèse d'un remboursement de l'impôt sur les huiles minérales.

Conclusions à propos des ressources financières requises et des instruments d'encouragement

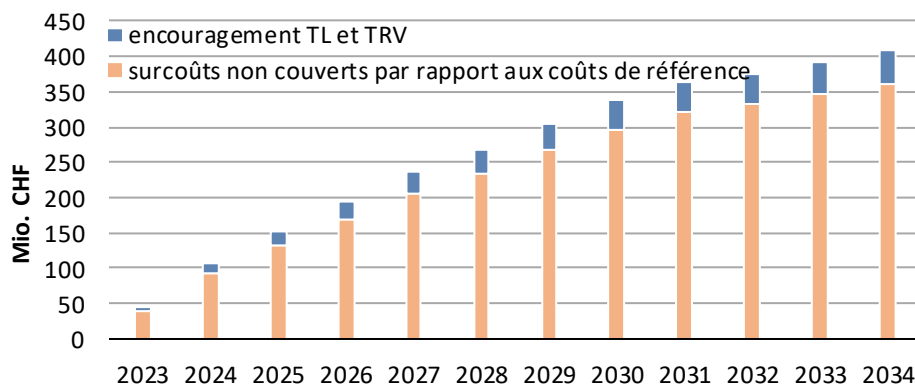
On constate que l'acquisition de bus à batterie représente pour les entreprises un surcoût considérable par rapport aux bus diesel (référence), que l'impôt sur les huiles minérales soit remboursé ou non. Le remboursement de cet impôt représente une aide financière indirecte pour les entreprises, qui sont ainsi incitées à privilégier les véhicules à carburant fossile ; du point de vue de la protection du climat, cette disposition est contre-productive. Si l'impôt sur les huiles minérales n'était plus remboursé, à tarifs et offre TP inchangés, les ET et les commanditaires de l'offre de TP (Confédération, cantons, communes) auraient besoin de ressources financières supplémentaires à court terme ; en revanche, cette mesure inciterait à une conversion rapide aux véhicules sans carburants fossiles, car la suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales réduirait clairement le surcoût des bus à batterie par rapport aux bus diesel.

Si la progression des bus à batterie sur le marché devait intervenir selon le scénario « réaliste », il faudrait augmenter les moyens financiers des entreprises de transports concessionnaires, en particulier si le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales subsistait et continuerait de privilégier le bus diesel comme technologie de référence. Pour financer le surcoût, les entreprises pourraient augmenter leurs recettes au moyen d'une hausse des tarifs. Toutefois, une telle hausse risque de provoquer un transfert modal nocif pour le climat et la politique des transports ; cet aspect ne figurait toutefois pas à l'agenda de la présente étude ou du postulat qui est à son origine.

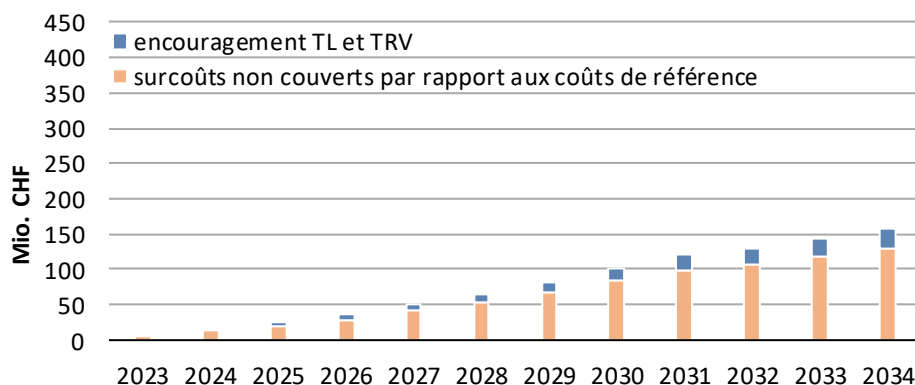
Les instruments d'encouragement nationaux (obligation de compenser les émissions de CO₂ par les importateurs de carburants, ressources du programme en faveur du trafic d'agglomération) ne couvrent qu'une partie relativement faible des ressources supplémentaires qui sont requises (fig. Z-4). Il convient de prendre en compte les interactions entre programmes d'encouragement et financement ordinaire des TP par les collectivités publiques. L'instrument de compensation des émissions de CO₂ par les importateurs de carburants favorise la conversion aux bus hybrides et électriques si elle n'est pas déjà prévue (p. ex. dans les dispositions légales). Le fonds en faveur du trafic d'agglomération de la Confédération est, par exemple, réservé aux mesures qui ne sont pas cofinancées d'office par la Confédération (p. ex. transports locaux).

Figure Z-4 : évolution des surcoûts couverts ou non par les instruments de soutien (myclimate/KliK + programme en faveur du trafic d'agglomération) dans le domaine des transports locaux et régionaux (y c. remboursement de l'impôt sur les huiles minérales aux entreprises de transports concessionnaires)

Scénario « maximal »



Scénario « réaliste »



TL: trafic local, TRV: trafic régional de voyageurs

Graphique : INFRAS. Source : estimations INFRAS.

Si le financement des surcoûts non couverts était assuré par les modalités de financement ordinaires des TP et des commandes, selon la clé de répartition actuelle entre Confédération, cantons et communes, les cantons se retrouveraient face à une charge financière supplémentaire élevée, car ils participent déjà au financement du trafic local et du trafic régional (fig. Z-5).

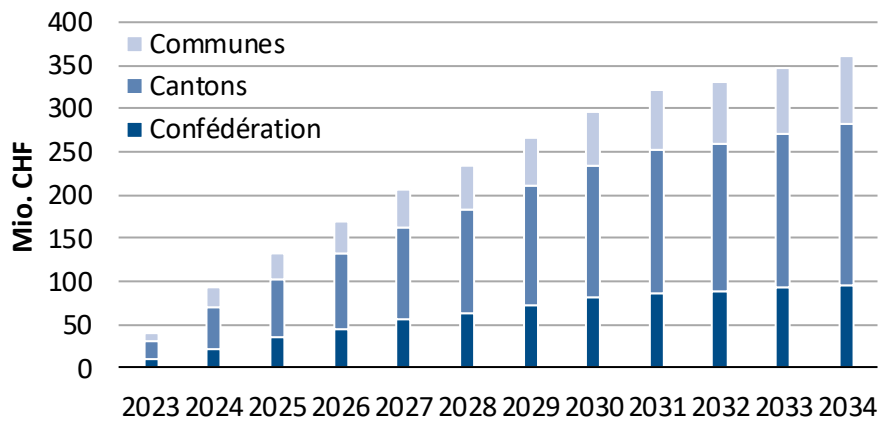
Dans le scénario « réaliste », qui inclut le remboursement de l'impôt sur les huiles minérales, le surcoût total cumulé entre 2023 et 2034 s'élèverait à 125 millions de francs pour la Confédération, à 395 millions de francs pour les cantons et à 240 millions de francs pour les communes.

Si cet impôt n'était plus remboursé, la différence de coût entre les bus diesel et les bus sans carburant fossile serait moins grande. Cette mesure est pourtant sans effet direct sur les besoins nécessaires au financement des bus électriques. Le surcoût de l'exploitation des bus

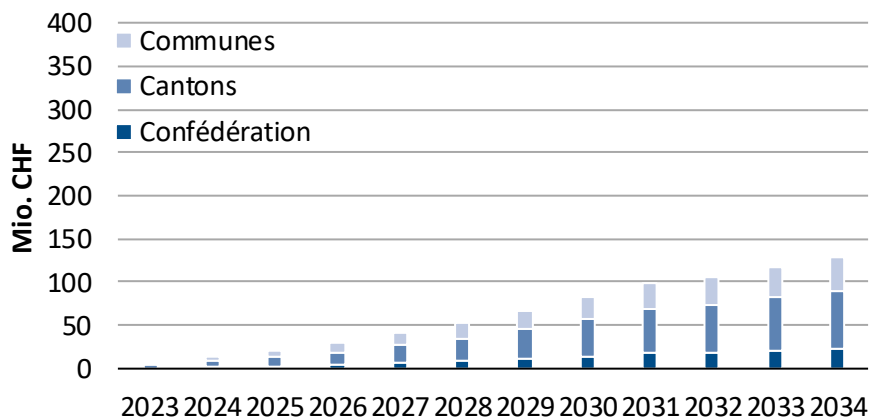
diesel du fait de la suppression du remboursement de l'impôt sur les huiles minérales provoquerait lui aussi une hausse des besoins financiers non couverts. L'affectation des revenus supplémentaires issus de l'impôt sur les huiles minérales (supplément compris) est obligatoire et ne permettrait donc pas d'accroître les ressources de la Confédération destinées aux transports publics régionaux. Les cantons et les communes ne recevraient pas de recettes supplémentaires pour couvrir le surcoût des TP. Compte tenu de la situation actuelle (perte de recettes dues au coronavirus), on peut se demander si les moyens supplémentaires pour financer les surcoûts prévus seront effectivement disponibles à partir de 2024.

Figure Z-5 : option de ventilation des besoins financiers selon les modalités ordinaires de financement des TP (TL et TRV), y c. remboursement de l'impôt sur les huiles minérales.

Scénario « maximal »



Scénario « réaliste »



TL: trafic local, TRV: trafic régional de voyageurs

Graphique : INFRAS. Source : estimations INFRAS.

Des instruments d'encouragement supplémentaires de la Confédération sont en mesure de faciliter la généralisation des bus à batterie sur le marché. Le calcul des aides devrait tenir

compte à la fois des investissements requis et du coût de la réduction d'émissions de CO₂ (en tonnes). La pertinence d'instruments supplémentaires de financement créés par la Confédération et la nature de ces instruments relèvent de décisions politiques et découlent du rapport relatif au postulat basé sur la présente étude de base.

Compendio

Mandato e procedimento

Le tecnologie di propulsione non fossile potrebbero rendere più ecologici i trasporti pubblici (TP) su strada in Svizzera. Oggi nei TP vengono impiegati circa 5 500 bus a diesel, di cui due terzi nel traffico regionale viaggiatori (TRV) e un terzo nel traffico locale (TL). Tuttavia il passaggio a veicoli a propulsione più ecologica è penalizzato dai costi supplementari, tuttora in parte elevati, rispetto ai bus a diesel. Sotto il profilo energetico e climatico la promozione dei bus a propulsione non fossile nei TP va accolta con favore; la sostituzione dei bus a diesel risulterebbe così notevolmente più rapida e i TP costituirebbero un esempio da seguire. Attualmente non è però possibile quantificare in modo affidabile né i costi né i benefici di un'eventuale promozione. Ai fini della stesura del rapporto sul postulato 19.3000 «Promuovere l'affermazione dei vettori di trasporto non fossili nei trasporti pubblici su strada» vanno pertanto create basi attendibili sull'impiego e sul potenziale di riduzione di CO₂ dei bus con propulsioni alternative.

Il presente studio di riferimento mette in evidenza, tenendo conto del progresso tecnologico, le opzioni di propulsione non fossile adatte ai trasporti pubblici su strada, nonché i costi e i benefici ambientali che ne derivano. In tale contesto vengono determinati i costi supplementari attuali e futuri rispetto ai bus a diesel. Lo studio illustra inoltre in quale misura tali costi supplementari potrebbero essere finanziati nell'ambito delle attuali condizioni quadro e con le odierne possibilità di promozione dei TP oggetto di ordinazione, definendo altresì il fabbisogno di finanziamento necessario per rafforzare la promozione delle tecnologie di propulsione non fossili. A tale riguardo va considerato che oggi i bus a diesel sono responsabili del 2 per cento circa delle emissioni di CO₂ del traffico in Svizzera; pertanto, eventuali meccanismi di promozione devono essere semplici ed efficienti.

Quali sono le opzioni di propulsione non fossile per i trasporti pubblici su strada?

Nel quadro di un'analisi degli effetti sono stati esaminati, in quanto veicoli a propulsione non fossile, i bus elettrici e i bus con motori a combustione azionati da carburanti biologici (biodiesel e biogas); questi veicoli sono stati poi confrontati con il bus convenzionale a diesel Euro 6. Tra i bus elettrici si sono considerati i bus a batteria con diversi sistemi di ricarica³ e i bus a celle combustibili.

³ Bus con ricarica in deposito: bus dotati di grosse batterie, che si ricaricano durante la notte per diverse ore nel deposito veicoli.

Bus con ricarica occasionale statica: bus dotati di piccole batterie, che si ricaricano per vari minuti durante le soste, solitamente ai capolinea.

Bus con ricarica occasionale dinamica, detti anche filobus a batteria: bus che possono in parte circolare collegati alla rete della linea di contatto e ricaricare durante questi tratti una batteria, che consente loro di circolare anche senza collegamento alla linea di contatto.

Sul piano ecologico i bus a batteria presentano netti vantaggi sia considerando le emissioni di gas a effetto serra e il fabbisogno di energia primaria sia, localmente, sul piano degli inquinanti atmosferici e del rumore nei quartieri. Considerando le emissioni, gli effetti positivi per i carichi ambientali si mantengono su valori simili sia a livello locale che regionale, mentre sul piano dell'incidenza gli effetti sono maggiori nel TL rispetto al TRV.

Riguardo alle emissioni di gas a effetto serra e di inquinanti atmosferici, i bus a celle combustibili con propulsione a idrogeno ottengono risultati simili a quelli dei bus a batteria. Presentano però un fabbisogno di energia primaria molto elevato, sia per la notevole energia richiesta per la produzione di idrogeno, sia per la grande perdita di energia dovuta alla trasformazione dell'idrogeno in corrente nella cella combustibile.

I bus a batteria implicano più materiali potenzialmente critici rispetto ai bus a diesel; i più rilevanti sono litio, cobalto, grafite e terre rare. I primi tre sono presenti soprattutto nelle batterie e le terre rare per lo più nei motori elettrici. Grazie ai procedimenti di riciclaggio odierni questi materiali possono essere recuperati quasi totalmente. Considerato il valore del materiale contenuto, le batterie dei bus verrebbero presumibilmente riciclate al termine del ciclo di vita. Ciononostante, l'aumento dei veicoli a batteria (soprattutto tra le automobili) può provocare un tale incremento della domanda di questi materiali critici, da causare a lungo termine delle carenze. Ad esse si potrà però ovviare visto che nei veicoli elettrici tutti questi materiali sono sostituibili.

I bus a biocarburanti presentano un fabbisogno di energia primaria minore dei bus elettrici poiché, per definizione metodica, non viene calcolato il tenore energetico dei rifiuti dai quali i biocarburanti sono ricavati. Il loro potenziale di riduzione dei gas a effetto serra (bus a biogas) è però minore di quello dei bus elettrici e non apporta, rispetto ai bus a diesel, miglioramenti rilevanti sul fronte delle locali emissioni di inquinanti atmosferici e di rumore (bus a biogas e biodiesel).

Sul piano dei costi occorre distinguere tra la situazione a breve termine e gli sviluppi prevedibili. Altrettanto rilevanti sono le condizioni quadro dei prezzi, che dipendono in parte anche da decisioni di tipo legislativo (p. es. rimborso dell'imposta sugli oli minerali). A breve termine e alle attuali condizioni quadro, i bus a batteria risultano tuttora relativamente cari; inoltre, il loro potenziale di adeguato impiego è limitato (soprattutto per i bus con ricarica in deposito che dispongono di un'autonomia ancora insufficiente dopo la ricarica). Tuttavia, a lungo termine i bus a batteria offrono potenzialmente, a seconda delle condizioni d'impiego e della presumibile durata di vita della batteria, le opzioni più convenienti. Anche l'abolizione del rimborso dell'imposta sugli oli minerali, che attualmente favorisce i bus a diesel, avrebbe ripercussioni positive sui bus a batteria.

A breve termine i bus a biocarburanti costituiscono tendenzialmente le opzioni più convenienti. Occorre chiedersi però se nel frattempo, in attesa che i vantaggi dei bus a batteria dispieghino i loro effetti, sia opportuno ricorrere a tali opzioni; sarebbe infatti necessario predisporre pompe di rifornimento di biodiesel e biogas, adeguare le officine e organizzare corsi di aggiornamento per il personale. Un argomento contrario all'uso dei biocarburanti è anche la loro limitata disponibilità, soprattutto di quelli prodotti in Svizzera. Il biodiesel svizzero, ad esempio, ricavato da olio alimentare usato (Used Cooking-Oil), non sarebbe sufficiente per tutti i bus dei TP svizzeri e potrebbe essere preso in considerazione solamente per singole linee. In tale contesto si pone quindi la domanda se, in un'ottica più ampia, l'impiego di biocarburanti sia da considerare piuttosto in ambiti in cui ad oggi mancano alternative di riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra, ad esempio nel trasporto di merci su strada a lunga distanza, nella navigazione d'alto mare o nel traffico aereo. Considerazioni analoghe valgono anche per i bus ibridi plug-in a biocarburanti.

Considerando globalmente i costi e i benefici per l'ambiente, occorre pertanto puntare sull'impiego di bus elettrici come alternativa non fossile ai bus a diesel, e ciò già a breve/medio termine, ma solo per impieghi adeguati sul piano dei costi. A lungo termine, a seguito dei prevedibili sviluppi dei bus a batteria sia in ambito tecnico sia riguardo ai costi, il loro potenziale di adeguato impiego aumenterà notevolmente sia nel TL che nel TRV. Diminuiranno così nettamente anche i costi di riduzione del CO₂ – a breve termine relativamente alti – dei bus elettrici, scendendo al di sotto dei 200 franchi per tonnellata di CO₂. Se il rimborso dell'imposta sugli oli minerali venisse abolito, in condizioni d'impiego ideali tali costi risulterebbero addirittura quasi azzerati. Riguardo ai costi di riduzione del CO₂, a breve termine ancora alti, va considerato che, al contrario dei bus a biocarburanti, i bus elettrici contribuiscono a evitare ulteriori costi esterni dovuti a rumore e inquinanti atmosferici, i quali, cumulati, risultano tre volte maggiori dei costi dei cambiamenti climatici causati dal traffico (INFRAS & Ecoplan 2019). I costi supplementari non devono essere quindi considerati solo relativamente alla riduzione del CO₂.

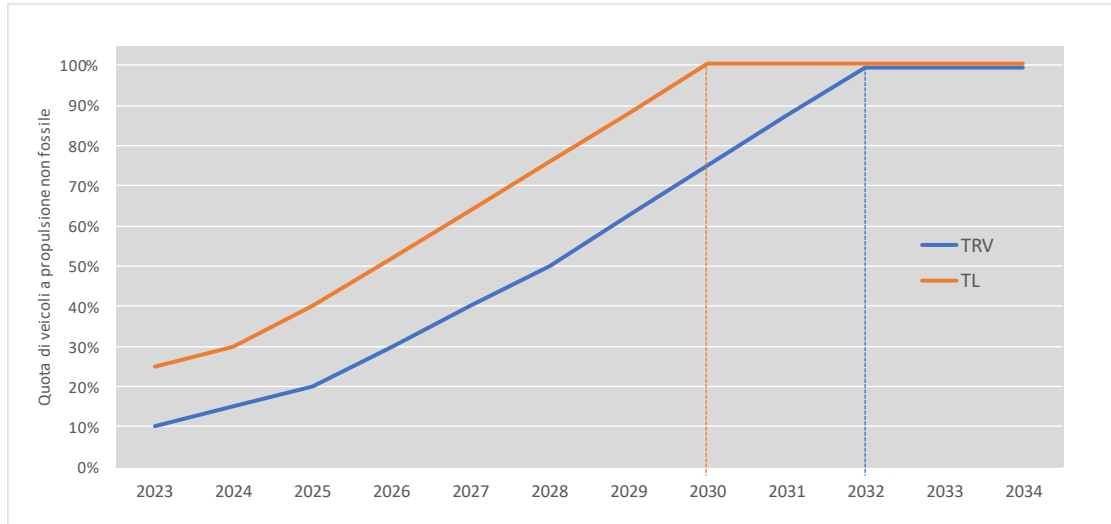
La decisione sui tipi di bus elettrici da considerare – filobus a batteria, bus con ricarica in deposito, bus con ricarica occasionale statica o anche bus a celle combustibili, ad esempio per la copertura di distanze giornaliere superiori a 400-500 km – dipende dalle condizioni specifiche di una determinata linea o rete di linee e quindi non può né deve essere oggetto del presente studio.

Potenziale per i bus a batteria e costi supplementari

Se si rendono necessarie sostituzioni, sul piano puramente tecnico sarebbe possibile sostituire tutti i veicoli con bus a propulsione non fossile (scenario indicato di seguito come «massimo»).

I bus a batteria sono però tuttora relativamente cari e a breve termine vengono pertanto ancora ritenuti economicamente inadeguati per molti campi d'impiego. Sul mercato i veicoli e le batterie sono infatti ancora relativamente cari; inoltre, a causa dell'autonomia ancora troppo limitata (per i bus con ricarica in deposito) o di pause ai capolinea insufficienti per la ricarica (bus con ricarica occasionale statica), occorrerebbe disporre di un maggior numero di veicoli rispetto all'esercizio con bus a diesel.

Soprattutto per motivi legati ai costi, ma anche per i tempi richiesti dall'acquisto dei veicoli, dalla realizzazione dell'infrastruttura di ricarica e dalla formazione del personale, a breve-medio termine non è opportuno o realistico sostituire tutti i bus a diesel con bus a batteria al momento di acquistare nuovi veicoli. Secondo le attuali strategie per i bus elettrici elaborate da imprese di trasporto, è pertanto stato definito uno scenario «realistico» per il passaggio dai bus a diesel ai bus a batteria. Tale scenario è stato differenziato a seconda del TL e del TRV, in quanto il cambiamento avrà presumibilmente luogo più in fretta a livello locale, dove si trovano i presupposti migliori, quali linee più brevi, topografie di regola meno impegnative e infrastrutture preesistenti per la linea di contatto. Il grafico seguente indica, per il cosiddetto scenario «realistico», su quali ipotesi si fondano le quote di veicoli sostituite con bus a batteria in caso di nuovi acquisti. Nel TL ipotizziamo già a breve termine quote comprese tra il 25 e il 50 per cento, nel TRV tra il 10 il 30 per cento. Secondo questo scenario saranno coinvolte soprattutto imprese di trasporto piuttosto grandi, che stanno già svolgendo test pilota con bus a batteria e che hanno formulato strategie per i bus elettrici, ma anche piccole imprese innovative. Sempre secondo lo scenario realistico, nel TL tutte le sostituzioni saranno quindi effettuate con bus a batteria a partire circa dal 2030, e nel TRV circa dal 2032.

Figura Z-1: quota di bus a batteria sui veicoli da acquistare – scenario «realistico»

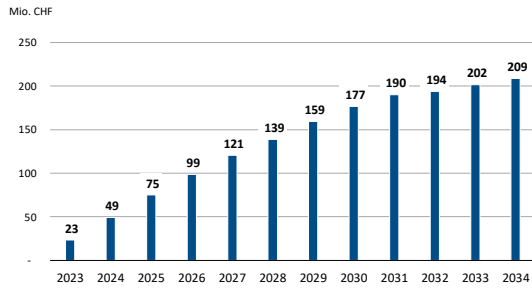
Esempio: nel 2023 il 10 per cento dei bus da acquistare è sostituito nel TRV da bus a batteria, il 90 per cento da bus convenzionali a diesel o ibridi a diesel. La quota dei bus a batteria aumenta di anno in anno. Dal 2032 tutti i bus da acquistare sono sostituiti da bus a batteria. Nel 2023, nel TL è sostituito da bus a batteria già il 25 per cento dei bus da acquistare. La data alla quale tutti i veicoli vengono sostituiti da bus a batteria è già il 2030.

Fonte: Ipotesi INFRAS.

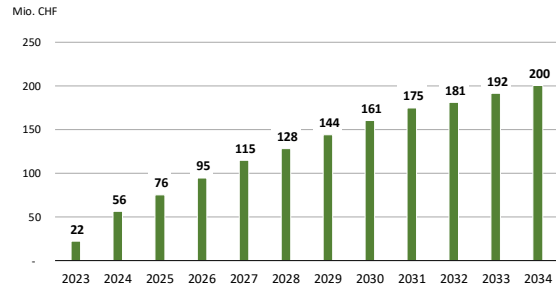
Tra il 2023 e il 2034 nel TRV andrebbero quindi sostituiti circa 1 900 veicoli, ossia circa il 50 per cento, e nel TL quasi 1 300 veicoli, ovvero circa il 70 per cento dell'intero parco veicoli. La figura seguente Z-2 indica i costi supplementari per le imprese di trasporto nel TRV e nel TL relativi a entrambi gli scenari alle attuali condizioni quadro, con rimborso dell'imposta sugli oli minerali. Per quanto concerne i bus elettrici, si stima una durata di vita di 12 anni per i veicoli (come per i bus a diesel), di 6 anni per le batterie. Nel caso dei bus con ricarica occasionale e vari cicli di ricarica al giorno, la durata di vita di 6 anni stimata per la batteria è realistica. Per i bus con ricarica in deposito, dotati di una grossa batteria e sottoposti di regola a un solo ciclo di ricarica al giorno, tale stima è molto prudente; per questi bus è senz'altro realistica una durata di vita della batteria di circa 12 anni. Una maggiore durata di vita di veicoli elettrici e batterie riduce in linea di massima i costi supplementari rispetto ai bus a diesel.

Figura Z-2: costi supplementari annui in caso di passaggio dai bus a diesel ai bus a batteria (stima approssimativa)

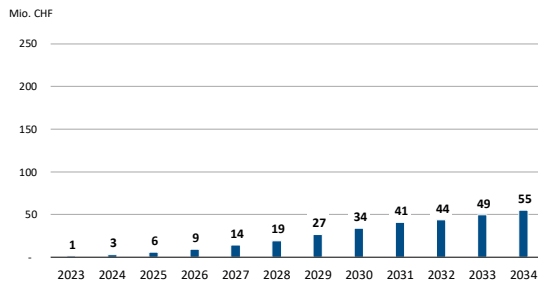
Traffico regionale (TRV)
Scenario «massimo»



Traffico locale (TL)
Scenario «massimo»



Scenario «realistico»



Scenario «realistico»

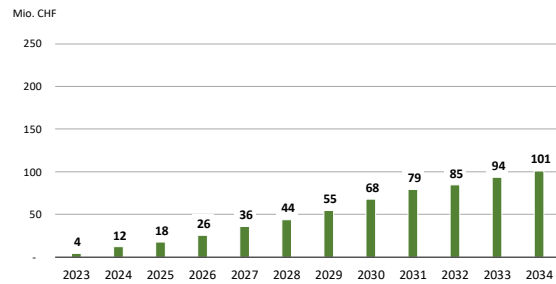


Grafico INFRAS.

Potenziale di riduzione del CO₂ con i bus a batteria

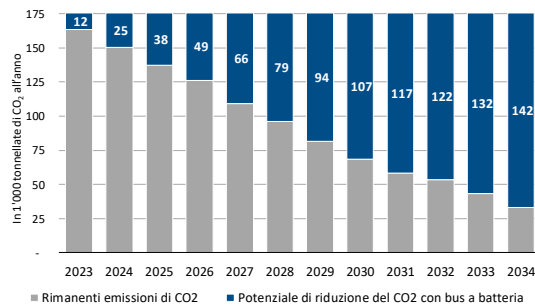
La figura Z-3 illustra il potenziale di riduzione del CO₂ nel TRV e nel TL per entrambi gli scenari. Lo scenario «massimo» prevede che nel 2034, quando tutti i bus a diesel saranno stati sostituiti da bus a batteria, il potenziale raggiunto sarà pari all'80–85 per cento. Nello scenario «realistico», il potenziale di riduzione per il TRV nel 2034, quando la metà dei bus a diesel sarà stata sostituita da bus a propulsione non fossile, ammonterà al 40–45 per cento. Nel TL circa il 70 per cento dei bus a diesel sarà stato sostituito nel 2034 con bus a batteria; il relativo potenziale di riduzione del CO₂ sarà del 60 per cento circa.

Figura Z-3: potenziale di riduzione del CO₂ in caso di passaggio dai bus a diesel ai bus a batteria

Traffico regionale

Emissioni di CO₂ di tutti i bus a diesel nel 2019:
175 000 t/a

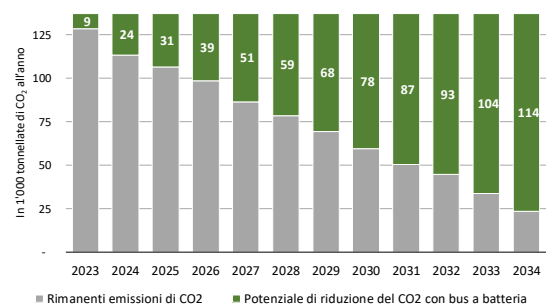
Scenario «massimo»



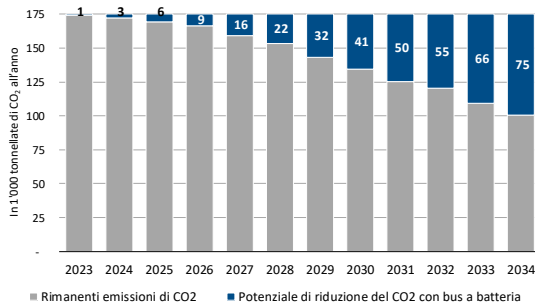
Traffico locale

Emissioni di CO₂ di tutti i bus a diesel nel 2019:
135 000 t/a

Scenario «massimo»



Scenario «realistico»



Scenario «realistico»

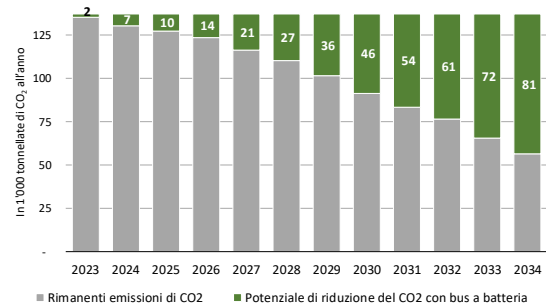


Grafico INFRAS.

Condizioni quadro normative, finanziamento dei TP e strumenti di promozione

Accanto al finanziamento (ordinario) e all'ordinazione di TL e TRV da parte di Confederazione, Cantoni e Comuni, le misure di promozione in vigore rivestono attualmente minore importanza. Tali misure riguardano soprattutto i veicoli a propulsione elettrica (Tabella Z-1), mentre i bus a biodiesel e biogas sono finanziati soprattutto nell'ambito dell'ordinazione dei TP. Le nuove soluzioni e innovazioni previste dal programma R&S, come pure le innovazioni nei TP (UFT) e del programma P-D (UFE) sono irrilevanti a livello di diffusione sul mercato. Il Programma Traffico d'agglomerato (PTA) dell'ARE prevede in particolare il finanziamento di misure infrastrutturali e solo in via eccezionale l'acquisto di veicoli. L'obbligo di compensazione del CO₂ per gli importatori di carburanti fossili, con il progetto di compensazione «Bus elettrici e ibridi», è l'unico strumento o programma complementare a livello nazionale che rappresenti, oltre al finanziamento dei TP, un incentivo finanziario alla copertura dei costi supplementari dei veicoli a propulsione

non fossile o scarsamente fossile; il principio di addizionalità va però rispettato e le imprese di trasporto non possono farsi computare la compensazione di CO₂.

Competenze, ampiezza della promozione e ambito di validità variano a seconda delle attuali possibilità di finanziamento e misure di promozione. Anche i processi seguono diverse disposizioni legali. Il finanziamento ordinario dei TP e il Programma Traffico d'agglomerato (PTA) sono processi che si svolgono regolarmente, ma di regola con ritmo biennale o quadriennale. Nel finanziamento ordinario dei TP sono coinvolti tutti e tre i livelli degli enti territoriali e in tale contesto i Cantoni svolgono il ruolo principale. Solo in singoli casi vi sono ulteriori misure di promozione a livello cantonale e comunale. La situazione è quindi complessa.

Tabella Z-2: finanziamento o possibilità di promozione di veicoli e tecnologie di propulsione

	E-bus con ricarica in deposito	E-bus con ricarica occasio- nale	Filobus a batteria	E-bus a celle com- bustibili	Bus a bio- diesel	Bus a biogas
Finanziamento ordinario TP						
R&S nonché innovazioni nei TP dal credito TRV (dal 2022)*						
Programma P-D*						
Programma Traffico d'agglomerato (PTA)**						
Obbligo di compensazione del CO ₂ per gli importatori di carburanti, progetto di compensazione myclimate «Bus elettrici e ibridi»						
Promozione comunale veicolo + infrastruttura di ricarica (p. es. fondo per il risparmio di energia /ewz)						

* Pur non essendo esclusa alcuna tecnologia di propulsione, le possibilità di promozione sono tuttavia meno interessanti (scarso carattere innovativo di nuovi investimenti).

** È possibile il cofinanziamento di linee di contatto, stazioni di ricarica e costi supplementari per l'acquisto di veicoli (i. p. veicoli elettrici con ricarica occasionale/in deposito), se in tal modo si risparmiano costi infrastrutturali per linee di contatto di filobus (art. 17a cpv. 2^{bis} LUMin)

Tabella INFRAS.

Poiché i TP sono ordinati e finanziati dagli enti pubblici, occorre dapprima chiedersi in quale misura siano necessarie ulteriori misure di promozione oppure se nel quadro del processo di ordinazione (e anche nella definizione degli obiettivi delle imprese, di regola parastatali o di diritto pubblico) sia possibile promuovere il passaggio a veicoli a propulsione non fossile o la loro diffusione nei TP. I Cantoni, che coordinano l'ordinazione per il TRV e spesso la cofinanziano

per il TL, svolgono a questo riguardo un ruolo di primaria importanza. Le strategie e i piani cantonali volti a raggiungere nei TP l'indipendenza da energie fossili e l'efficienza sul piano energetico possono promuovere la diffusione dei veicoli a propulsione non fossile. Nel contempo devono però essere disponibili anche i relativi mezzi finanziari da parte di Confederazione, Cantoni e Comuni.

Circa un terzo dei Cantoni dispone attualmente di una strategia per rendere i TP indipendenti da energie fossili ed efficienti sul piano energetico, mentre in due Cantoni la preparazione di tale strategia è in corso. In quasi tutti i Cantoni i costi supplementari per i bus a propulsione non fossile ed efficienti sul piano energetico possono essere coperti in linea di principio tramite il finanziamento ordinario dei TP o sono già cofinanziati in tal modo. Non è possibile valutare in qual misura i necessari mezzi finanziari saranno disponibili in futuro (questa valutazione non è oggetto del presente studio); in linea di massima si deve presupporre che la situazione finanziaria varierà notevolmente da un Cantone o Comune all'altro.

Attualmente la procedura di ordinazione e il sistema di rilevamento della qualità del TRV (come base delle convenzioni sugli obiettivi) non tengono conto degli obiettivi ambientali. Non vi sono disposizioni – simili a quelle della normativa europea (Clean Vehicle Directive) – riguardanti gli acquisti per il TRV; tuttavia, secondo le nuove disposizioni, l'acquisto di bus a propulsione alternativa nel TRV deve essere previamente approvato. In singoli Cantoni sono in vigore disposizioni relative all'acquisto (p. es. nella legge sui TP di Basilea-Città). Generalmente va rispettato il principio di addizionalità delle misure di promozione e finanziamento dei TP; tuttavia, se il committente pone condizioni sugli standard ambientali dei bus da acquistare, non si può ritenere che in progetti di compensazione come il programma «Bus ibridi ed elettrici» (strumento sull'obbligo di compensazione del CO₂ per gli importatori di combustibili) il principio di addizionalità sia dimostrato. Questo strumento nazionale di promozione potrebbe quindi risultare meno importante.

Nel contempo, il rimborso dell'imposta sugli oli minerali per le ITC – che per tali imprese rappresenta un aiuto finanziario indiretto – costituisce un rilevante disincentivo all'acquisto di bus a propulsione non fossile. Attualmente tali rimborsi ammontano in media a circa 70 mio. di franchi all'anno.

Conclusioni sul potenziale per i bus a batteria e sui costi supplementari

Dal lato puramente tecnico una sostituzione completa e a breve termine del parco bus a diesel con bus a batteria sarebbe possibile, ma alla luce dell'attuale livello tecnologico risulterebbe economicamente inadeguata e poco sensata sia nel TL sia nel TRV. Alle attuali condizioni quadro i bus a batteria risultano relativamente cari; inoltre, i bus con ricarica in deposito generano, vista l'autonomia insufficiente, un maggiore fabbisogno di veicoli con i relativi costi. Dovendo

presupporre che i fondi di Confederazione, Cantoni e Comuni per i trasporti pubblici saranno limitati, si tratta di ottimizzare, soprattutto a breve e medio termine, i benefici ambientali, trovando un giusto equilibrio tra ampliamento dell'offerta (mirando a incentivare ulteriormente il trasferimento del traffico viaggiatori ai trasporti pubblici) e impiego di bus elettrici. L'investimento nel passaggio a bus elettrici non deve causare una cannibalizzazione di offerte esistenti nel TP (o di ampliamenti dell'offerta). I fondi investiti a questo scopo devono quindi aggiungersi a quelli destinati al finanziamento dei trasporti pubblici.

Sulla base dello scenario «realistico» sopra descritto, che tiene conto dell'ottimizzazione dei benefici summenzionata, dal 2023 al 2034 nel TRV si potrebbe sostituire circa il 50 per cento degli attuali bus a diesel, ossia ca. 1 900 veicoli, con bus a batteria. Nello stesso periodo, nel TL sarebbe possibile sostituire circa il 70 per cento dei bus a diesel, ossia 1 300 veicoli, con bus elettrici a propulsione non fossile.

Supponendo che il rimborso dell'imposta sugli oli minerali per i bus a diesel rimanga in vigore, lo scenario «realistico» prevede che i costi supplementari rispetto a quelli dei bus a diesel si aggirino nel TRV sui 20 mio. di franchi all'anno, per poi aumentare fino a 40–50 mio. circa di franchi all'anno nel 2030; con lo stesso presupposto, nel TL questi costi sarebbero invece compresi a breve termine tra i 10 e i 40 mio. di franchi all'anno per poi salire fino al 2030 a circa 100 mio. di franchi all'anno.

Conclusioni sul fabbisogno di finanziamento e sugli strumenti di promozione

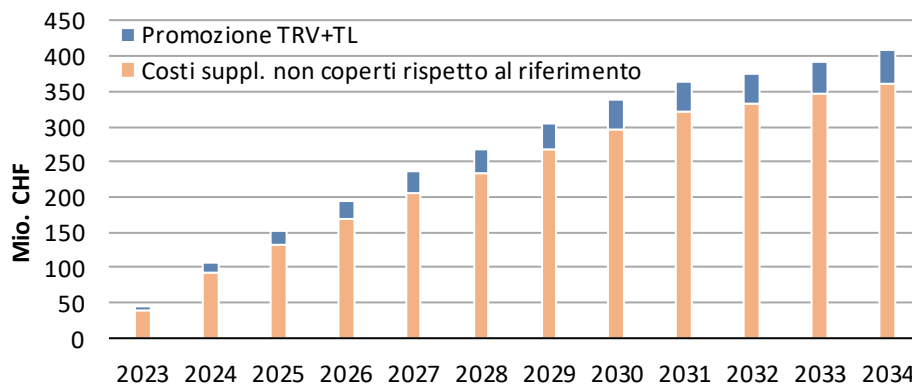
Calcolando i costi supplementari dei bus a batteria rispetto a quelli dei bus a diesel (riferimento) senza rimborso dell'imposta sugli oli minerali, il risultato presenta una grossa differenza. Tale rimborso costituisce un aiuto finanziario indiretto all'acquisto di veicoli a propulsione fossile e un disincentivo finanziariamente rilevante nell'ottica della politica climatica. Con tariffe e offerta dei TP invariate, l'abolizione del suddetto rimborso aumenterebbe in un primo tempo il fabbisogno finanziario per le IT e i committenti dei TP (Confederazione, Cantoni, Comuni), ma promuoverebbe una più rapida diffusione dei bus a propulsione non fossile poiché ridurrebbe nettamente la differenza di costi tra tali bus e i bus a diesel.

Se la diffusione sul mercato dei bus a batteria avverrà secondo lo scenario realistico, i mezzi finanziari delle ITC dovranno aumentare, in particolare se il rimborso dell'imposta sugli oli minerali rimarrà in vigore favorendo così la tecnologia di riferimento dei bus a diesel. Per finanziare i costi supplementari, le ITC potrebbero aumentare le entrate alzando le tariffe. Tali aumenti possono però provocare trasferimenti modali indesiderati sul piano della politica climatica e dei trasporti. Questo ambito non è tuttavia oggetto né del presente studio né del postulato.

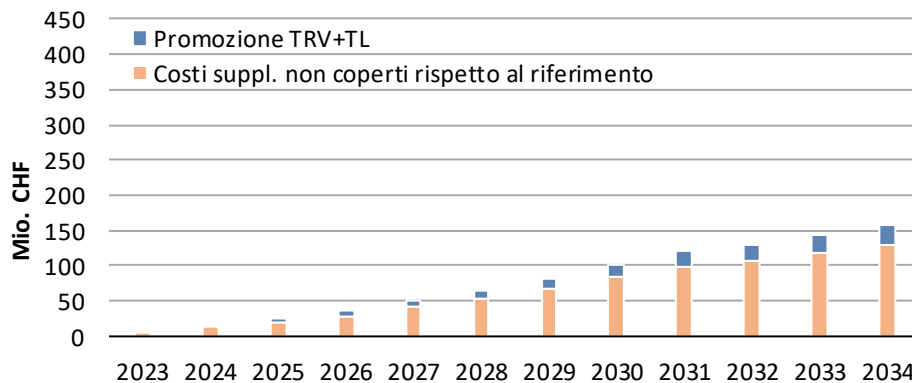
Finora gli strumenti nazionali di promozione attualmente in vigore (l'obbligo di compensazione del CO₂ per gli importatori di carburanti fossili e il Programma Traffico d'agglomerato, PTA) possono coprire una parte relativamente modesta del fabbisogno supplementare di finanziamento (figura Z-4). A questo riguardo vanno considerati gli effetti dell'interazione tra i programmi di promozione e il finanziamento ordinario dei TP da parte di Confederazione, Cantoni e Comuni. L'obbligo di compensazione del CO₂ per gli importatori di carburanti fossili incentiva il passaggio a bus ibridi ed elettrici, qualora esso non sia già prescritto (p. es. da norme di legge). I contributi federali previsti dal PTA sono ad esempio erogati solo per misure che non sono già cofinanziate dalla Confederazione (p. es. TL).

Figura Z-4: evoluzione dei costi supplementari coperti da contributi di promozione e di quelli non coperti (myclimate/KliK + PTA) per TRV+TL (incl. rimborso dell'imposta sugli oli minerali per le ITC)

Scenario «massimo»



Scenario «realistico»



ITC: imprese di trasporto concessionarie, TL: traffico locale, PTA: Programma Traffico d'agglomerato, TRV: traffico regionale viaggiatori

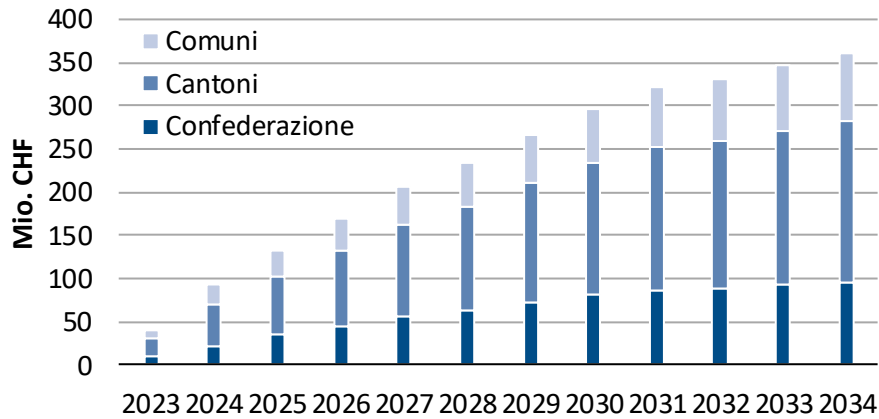
Grafico INFRAS. Fonte: Stime INFRAS.

Se i costi supplementari non coperti fossero finanziati tramite l'ordinazione e il finanziamento ordinario dei TP secondo l'attuale ripartizione (Confederazione, Cantoni, Comuni), il carico supplementare graverebbe soprattutto sui Cantoni, che cofinanziano sia il TRV sia il TL (figura Z-5). Secondo lo scenario realistico e considerando il vigente rimborso dell'imposta sugli oli minerali, nel periodo 2023–2034 il fabbisogno finanziario supplementare ammonterebbe complessivamente a circa 125 mio. di franchi per la Confederazione, 395 mio. di franchi per i Cantoni e 240 mio. di franchi per i Comuni.

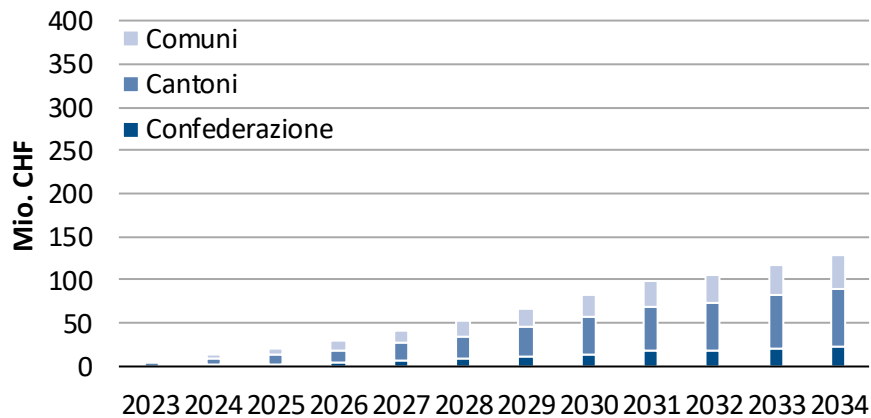
L'abolizione del rimborso dell'imposta sugli oli minerali, pur riducendo al minimo la differenza di costo tra bus a diesel e bus a propulsione non fossile, non avrebbe alcun influsso diretto sul fabbisogno finanziario scoperto sul piano del finanziamento ordinario dei TP. I costi supplementari per i bus a diesel a seguito dell'abolizione del rimborso dell'imposta sugli oli minerali, provocherebbero anch'essi un aumento del fabbisogno non coperto di finanziamento; inoltre, le maggiori entrate dall'imposta sugli oli minerali (incl. supplemento) della Confederazione, in gran parte a destinazione vincolata, non andrebbero automaticamente ad aumentare i fondi federali per il TRV; i Cantoni e i Comuni non riceverebbero ulteriori fondi per coprire i costi supplementari nei TP. A causa dell'attuale situazione (perdita di entrate dovuta al Covid 19) si pone la domanda se i fondi supplementari potranno essere disponibili, in particolare dal 2024, per finanziare i costi supplementari stimati.

Figura Z-5: possibile ripartizione del fabbisogno di finanziamento secondo il finanziamento ordinario dei TP (TRV+TL), incl. rimborso dell'imposta sugli oli minerali

Scenario «massimo»



Scenario «realistico»



TL: traffico locale, TRV: traffico regionale viaggiatori

Grafico INFRAS. Fonte: Stime INFRAS.

Ulteriori possibilità di promozione da parte della Confederazione possono aumentare la diffusione sul mercato dei veicoli a propulsione non fossile. I contributi di promozione dovrebbero essere commisurati sia ai costi supplementari sia ai costi per tonnellata di CO₂ ridotta. Se vi siano ulteriori strumenti di finanziamento adatti nell'ottica della Confederazione e di quali si tratti, è una questione che rientra nell'ambito di una decisione politica e, come tale, sarà oggetto del rapporto sul postulato redatto in base allo studio di riferimento.

1. Auftrag und Vorgehen

Heute stellen unter anderem Mehrkosten von Bussen mit nicht fossilen Antriebstechnologien gegenüber Dieselbussen ein Hemmnis dar, um den öffentlichen Busbetrieb umweltfreundlicher zu machen. Aus Sicht der Energie- und Klimapolitik ist die Förderung von Bussen mit fossilfreien Antriebstechnologien zu begrüßen, denn diese würde den Ersatz von Dieselbussen wesentlich beschleunigen. Heute sind jedoch weder Kosten noch Nutzen einer Förderung verlässlich zu beziffern. Deshalb sollen zum Einsatz- und CO₂-Reduktionspotenzial von Bussen mit fossilfreien Antrieben heute und in Zukunft belastbare Grundlagen geschaffen werden.

Die vorliegende Studie zeigt mittels einer Auslegeordnung zum Nutzen (CO₂, Energie, Luftreinhaltung) und zu den Kosten, auf welchen Linien(-typen) welche Buskonzepte möglich sind, wie sich die Kosten unter Berücksichtigung des technologischen Fortschritts entwickeln werden. Daraus abgeleitet werden heutige bzw. zukünftige Mehrkosten gegenüber der Diesel-Referenz. Weiter zeigt die Studie die bestehenden Rahmenbedingungen sowie Fördermöglichkeiten für nicht fossile Antriebstechnologien auf. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Dieselbusse heute insgesamt rund 2% der CO₂-Emissionen des Verkehrs⁴ in der Schweiz ausmachen. Die externen Kosten mit Bussen im öffentlichen Personenverkehr werden derzeit auf rund 250 Mio. Franken pro Jahr geschätzt (ARE 2020b). Allfällige Fördermechanismen sollten daher sehr einfach und effizient gehalten sein. Die Studie gilt als Grundlage für den Postulatsbericht 19.3000 (Nichtfossilen Verkehrsträgern im öffentlichen Verkehr auf Strassen zum Durchbruch verhelfen). Die Erarbeitung des Postulatsberichts erfolgt durch das UVEK.

Die Grundlagenstudie gliedert sich wie folgt: Kapitel 2 (Bestandsanalyse Dieselbuslinien in der Schweiz) stellt die wichtigsten Flotten- und Linienkennzahlen zusammen. Diese dienen u.a. zur Hochrechnung der quantitativen Ergebnisse auf die gesamte Schweiz. Kapitel 3 gibt einen umfassenden Überblick zum Stand und die zu erwartenden Entwicklungen nicht fossiler Antriebssysteme als Alternativen zum heutigen Dieselbus. Zudem werden die technischen Einsatzpotenziale diskutiert. Im Kapitel 4 erfolgt eine quantitative Auswirkungsanalyse zu den Kosten und zur Ökologie anhand von Fallbeispielen, welche typische Einsatzfelder sowohl im Orts- als auch im Regionalverkehr in der Schweiz repräsentieren. Ergänzend werden weitere Kriterien qualitativ beurteilt. Das Kapitel 5 zeigt schliesslich die regulatorischen Rahmenbedingungen in der Schweiz inkl. Blick ins Ausland auf. Zudem werden bestehende Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten für nicht fossile Antriebsoptionen im Busverkehr diskutiert. Das abschliessende Synthesekapitel 6 zeigt dann die Reduktionspotenziale für die Treibhausgasemissionen und die damit verbundenen Mehrkosten, hochgerechnet auf die ganze Schweiz. Darauf abgestützt werden die bestehenden Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten beurteilt.

⁴ Quelle: BAFU – Treibhausgasinventar, Stand 2018.

2. Bestandsanalyse Dieselbuslinien in der Schweiz

Die Bestandsanalyse zu den Linien des Regionalen Personenverkehrs (RPV) und des Ortsverkehrs (OV) basiert auf folgenden Grundlagen:

- Linienkennzahlen zu den RPV-Linien: Grundlagen BAV
- Linienkennzahlen zu den Ortslinien: Umfrage bei den Transportunternehmen, organisiert durch BFE/VöV
- Flottenkennzahlen RPV und Ortsverkehr: TU-Umfrage, organisiert durch BFE/VöV

In den folgenden Kapiteln sind Ergebnisse aus diesen Grundlagen zusammengestellt.

Hinweis: Heute verkehren in der Schweiz über 550 Trolleybusse. Die Bestandsanalyse bzw. die dazu durchgeführte Umfrage bei den Transportunternehmen bezieht sich in Anlehnung an das Ziele des Postulats (nicht fossilen Verkehrsträgern im öffentlichen Verkehr auf Strassen zum Durchbruch verhelfen) selbstredend nur auf Dieselfahrzeuge.

2.1. Rücklauf und Stichprobe der TU-Umfrage

Im Rahmen der Umfrage wurden insgesamt 70 Transportunternehmen (TU), welche öffentlichen Strassentransport mit Bussen betreiben, im Januar 2020 befragt. Insgesamt 48 Transportunternehmen haben geantwortet. Die damit erfasste Dieselbusflotte umfasst 5'271 Fahrzeuge (vgl. Abbildung 1). Die Stichprobe beträgt damit schätzungsweise über 90% sämtlicher heute im öffentlichen Verkehr eingesetzter Busse.⁵

⁵ Flottenbestand im Jahre 2015: 5'410 Busse (exkl. Trolleybusse); Quelle: BFS; Fahrzeuge und Transportmittelbestände des Personenverkehrs; veröffentlicht am 31.01.2020

Abbildung 1: In der TU-Umfrage erfasste Transportunternehmen und Anzahl Busse (Stand Januar 2020)

Transportunternehmen	Abkürzung	TU-Nr	Anzahl Busse
1 Autobus AG Liestal	AAGL	811	39
2 Auto AG Rothenburg	AAGR	812	35
3 Auto AG Schwyz	AAGS	340	41
4 Rottal Auto AG	ARAG	819	23
5 Aare Seeland mobil AG	asm	870	29
6 Autobetrieb Sernftal AG	AS	856	11
7 Busbetrieb Aarau	BBA	502	37
8 BERNMOBIL (BEM)	BEM	827	122
9 Baselland Transport AG	BLT	122	62
10 Busbetrieb Lichtensteig-Wattwil-Ebnat-Kappel	BLWE	810	5
11 Busbetrieb Olten Gösgen Gäu AG	BOGG	793	45
12 BUS Ostschweiz AG	BOS	334	89
13 Busbetrieb Rapperswil - Eschenbach - Rüti	BRER	772	11
14 Busbetrieb Solothurn und Umgebung AG	BSU	542	39
15 Bus und Service AG - Chur	BuS_Chur	766	27
16 Bus und Service AG - Engadin	BuS_Engadin	766	22
17 Busland AG	BLAG	871	39
18 Basler Verkehrsbetriebe	BVB	303	112
19 Ferrovie Autolinee Regionali Ticinesi	FART	817	43
20 Grindelwald Bus AG	GWB	859	10
21 Verkehrsbetriebe Leuk-Leukerbad und Umgebung	LLB	855	17
22 Transports de la région Morges-Bière-Cossonay SA	MBC	29	60
23 PostAuto AG	PAG	7	2'204
24 Regionalverkehr Bern-Solothurn AG	RBS	170	43
25 Regionale Verkehrsbetriebe Baden-Wettingen	RVBW	715	64
26 Stadtbus Frauenfeld	SBF	797	12
27 Autobus Sierre-Montana-Crans	SMC	142	19
28 STI Bus AG	STI	146	85
29 Transports Publics de la Région Lausannoise	TL	519	148
30 Transports Publics du Chablais	TPC	105	38
31 ransports publics fribourgeois Trafic	TPF	834	192
32 Transports publics genevois	TPG	316	226
33 TRASPORTI PUBBLICI LUGANESI	TPL	955	72
34 Transports publics de la Région Yvertois	TPN	741	34
35 Transports Publics Neuchâtelois	transN	47	96
36 Transports Vallée-de-Joux - Yverdon-les-Bains - Sainte-Croix	TRAVYS	37	50
37 Verkehrsbetriebe Biel	VB	889	34
38 Verkehrsbetrieb der Landschaft Davos	VBD	740	17
39 Verkehrsbetriebe Luzern	VBL	523	81
40 Verkehrsbetriebe St.Gallen	VBSG	885	65
41 Verkehrsbetriebe Schaffhausen	VBSH	836	35
42 Transports publics Vevey-Montreux-Chillon-Villeneuve	VMCV	543	38
43 Zugerland Verkehrsbetriebe	ZVB	185	111
44 Zürcher Verkehrsverbund	ZVV	544	689
total			5'271

ZVV umfasst die fünf TU VBZ, VBG, SZU, SBW, VZO; PAG ist separat geführt.

Grafik INFRAS. Quelle: TU-Umfrage BFE/VöV 2020.

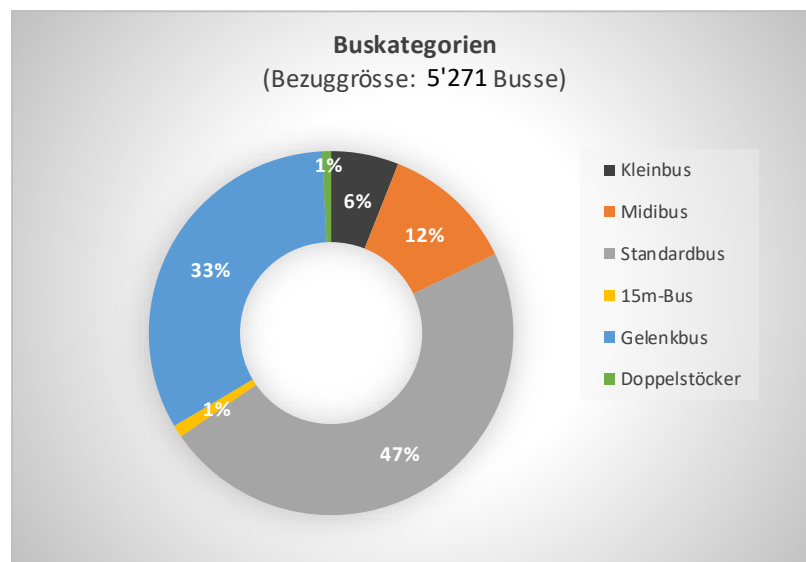
2.2. Flottenkennzahlen

Buskategorien

Von der Gesamtflotte RPV und Ortsverkehr in der Schweiz entfallen knapp die Hälfte auf Standardbusse und rund ein Drittel auf Gelenkbusse. Der Anteil Midibusse liegt bei 12%, der Anteil Kleinbusse bei 6%. 15m-Busse und Doppelstöcker haben mit je rund 1% eine geringe Bedeutung.

Doppelgelenkbusse kommen heute ausschliesslich als (Batterie-)Trolleybusse vor und fehlen deshalb in der Abbildung 2.

Abbildung 2: Verteilung der Diesel-Busse in der Schweiz auf verschiedene Busgrössen (RPV & Ortsverkehr)



Grafik INFRAS. Quelle: TU-Umfrage BFE/VöV 2020

Abbildung 3: Grössenordnungen zu Fahrzeuglängen und Beförderungskapazitäten verschiedener Busgrössen

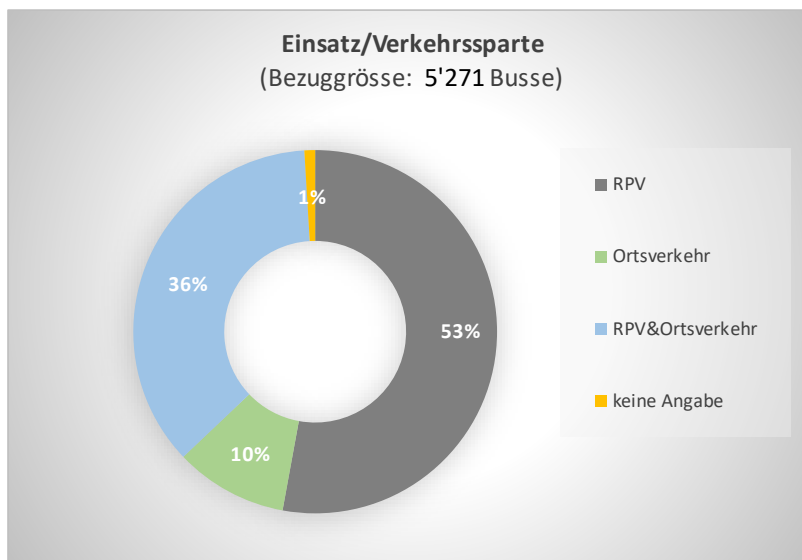
	Fahrzeuglänge [m]	Sitzplätze	Stehplätze (4P/m ²)	Sitz- + Stehplätze
Kleinbus	7	15	10	25
Midibus	10	25	15	40
Standardbus	12	35	35	70
Gelenkbus	18	50	60	110
Doppelstöcker	13	70	25	95

Grafik INFRAS.

Buseinsatz nach Verkehrssparte

Von den über 5'000 Bussen in der Schweiz werden gut die Hälfte (53%) ausschliesslich im regionalen Personenverkehr (RPV) eingesetzt. Der Anteil nur im Ortsverkehr⁶ eingesetzter Busse ist gemäss Umfrage mit 10% vergleichsweise klein. Über ein Drittel (36%) werden flexibel im RPV und Ortsverkehr eingesetzt. Die Kategorie «RPV&Ortsverkehr» dürfte jedoch überschätzt sein, weil vermutlich die TU im Rahmen dieser Umfrage teilweise die Zuteilung der Fahrzeuge nicht detailliert vornehmen konnten.

Abbildung 4: Buseinsatz nach Verkehrssparte



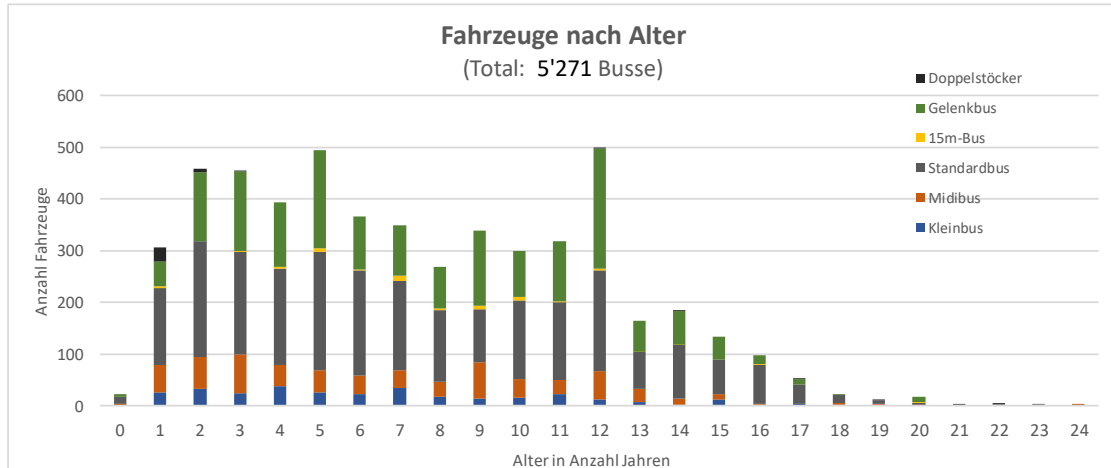
Grafik INFRAS. Quelle: TU-Umfrage BFE/VöV 2020

Alter der Busflotte

Die folgende Abbildung zeigt das Alter der heute in der Schweiz eingesetzten Busse. Daraus geht hervor, dass teilweise die Fahrzeuge auch nach der buchhalterisch definierten Abschreibungsdauer (ca. 12 Jahre für Gelenk- und Standardbusse, Midi-/Kleinbusse i.d.R. etwas kürzer) weiterhin im Einsatz stehen.

⁶ Definition Ortsverkehr: Unter den Ortsverkehr fallen alle Buslinien des Orts- und Agglomerationsverkehrs, die nicht durch das BAV bestellt und finanziert werden. Dies im Gegensatz den Buslinien des regionalen Personenverkehrs (RPV), die durch das BAV (zusammen mit den Kantonen) bestellt und finanziert werden.

Abbildung 5: Alter der heute eingesetzten Busse



Grafik INFRAS. Quelle: TU-Umfrage BFE/VöV 2020

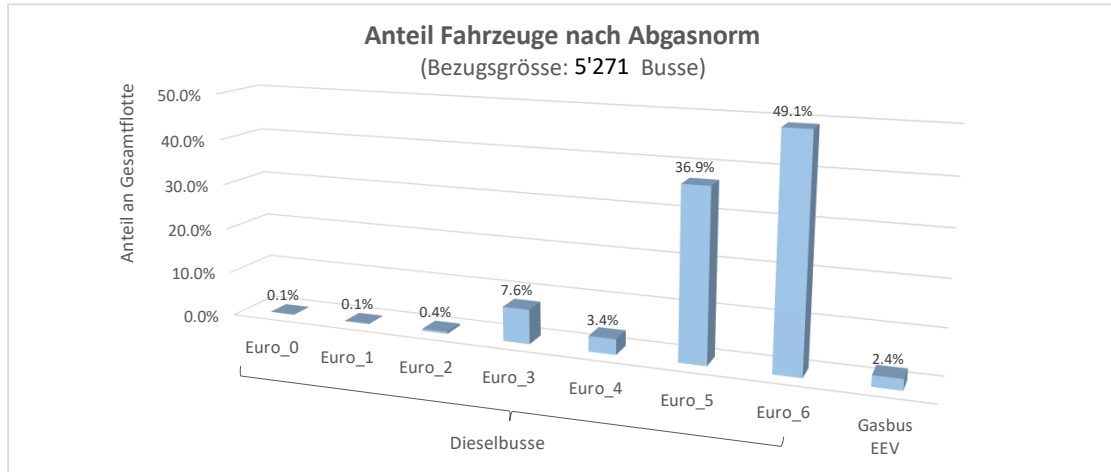
Abgasnorm

Rund die Hälfte der heute eingesetzten Busse erfüllen die höchste Abgasnorm Euro 6. Bei knapp 40% handelt es sich um Euro 5 Fahrzeuge. Der Anteil der noch im Einsatz stehenden Busse mit Euro 3 und 4 liegt bei ca. 10%.

Bei 2–3% aller Busse handelt es sich um Gasbusse mit dem Abgasstandard EEV.⁷ In der Umfrage erfasst sind Gasbusse für Bernmobil (76 Busse), Basler Verkehrsbetriebe (38), Busbetrieb Olten Gösigen Gäu (9) und Transports publics de la région lausannoise (2).

⁷ Enhanced Environmentally Friendly Vehicle; freiwilliger europäischer Abgasstandard für Busse und Lastkraftwagen, der von der Abgasqualität in etwa der Norm Euro 5 entspricht.

Abbildung 6: Fahrzeuge nach Abgasnorm



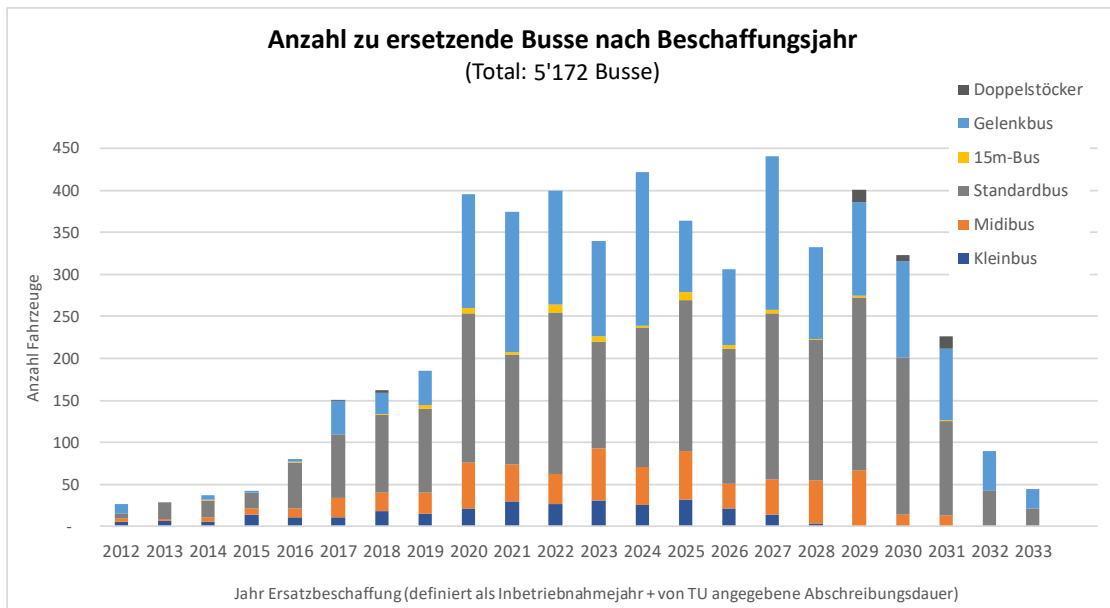
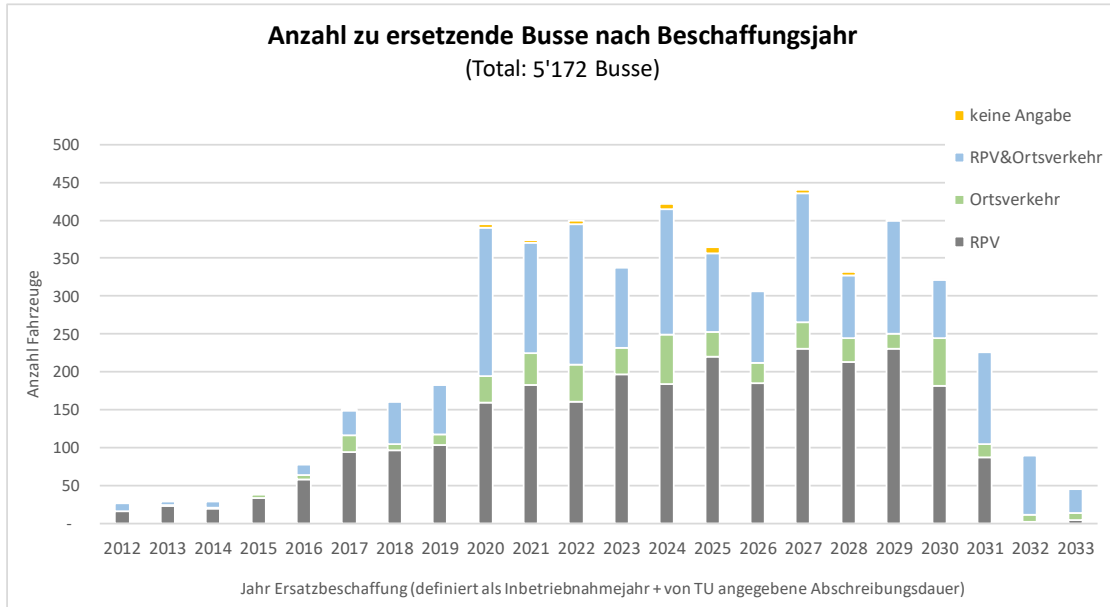
Grafik INFRAS. Quelle: TU-Umfrage BFE/VöV 2020

Wie viele Busse sind in den nächsten Jahren zu ersetzen?

Die Abbildung 7 zeigt, in welchen Jahren wie viele Busse der bestehenden Busflotte altershalber zu ersetzen sind. Ermittelt wurde das Ersatzbeschaffungsjahr über die Angaben zum Inbetriebnahmejahr und der von den TU angegebenen Abschreibungsdauer. Aus der Abbildung 7 geht hervor, dass ein Teil der Flotte bereits in den letzten Jahren hätte ersetzt werden sollen. Bei diesen Fahrzeugen handelt es sich somit um Busse, welche offensichtlich über ihre buchhalterische Abschreibungsdauer hinaus im Einsatz stehen.⁸ Bei diesen Bussen wird davon ausgegangen, dass sie in den nächsten 10 Jahren ersetzt werden. Bei diesen Fahrzeugen aus der Periode 2012-2020 ist es gut möglich, dass nicht alle Busse tatsächlich ersetzt werden, beispielsweise, weil sie nur noch als Reservefahrzeuge für den Notfall vorgehalten werden. Aufgrund von weiteren Angebotsausbauten ist aber auch wahrscheinlich, dass zusätzliche Busse beschafft werden. Hier gehen wir pragmatisch davon aus, dass sich diese Effekte die Waage halten werden.

⁸ Diese Abschreibungsdauer entspricht in der Regel der buchhalterischen Lebensdauer der Fahrzeuge. Die effektive Nutzungsdauer kann auch länger sein. Weil keine detaillierten Informationen zur effektiven Nutzungsdauer vorliegen, wurde pragmatisch angenommen, dass die von den TU angegebene Abschreibungsdauer auch der Nutzungsdauer entspricht.

Abbildung 7: Übersicht über die Fahrzeugersatzbeschaffungen nach Sparte und Busgrösse gemäss TU-Umfrage



Bemerkung zur Stichprobe: Die Stichprobe ist hier um ca. 100 Busse (2%) kleiner, weil davon ausgegangen wird, dass von den TU angegebenen, sehr alten Fahrzeuge (älter als 20 Jahre) nicht mehr ersetzt werden, weil sie nicht mehr im Regelbetrieb im Einsatz stehen.

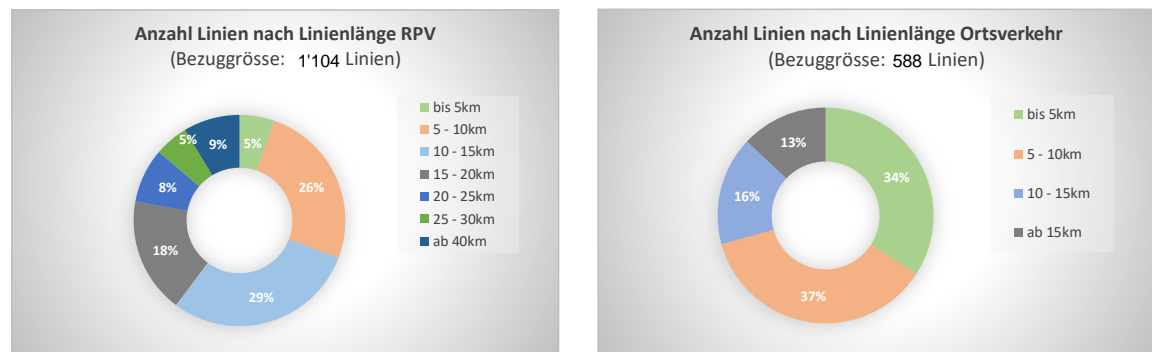
Grafik INFRAS. Quelle: TU-Umfrage BFE/VöV 2020

2.3. Linienkennzahlen

Linienlängen

Abbildung 1 zeigt die Verteilung der Anzahl Linien nach Linienlänge. Gut die Hälfte (55%) der RPV-Linien weist Linienlängen unter 15 km auf. Bei ca. 15% handelt es sich um sehr lange Linien mit Längen von über 25 km (linke Grafik). Beim Ortsverkehr entfallen 70% in die Kategorie < 10 km (rechte Grafik).

Abbildung 8: Anzahl Linien nach Linienlänge für RPV und Ortsverkehr

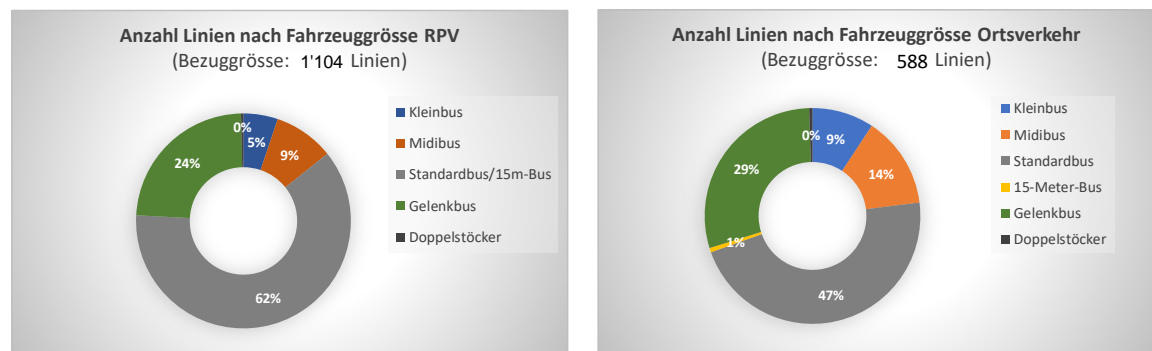


Grafik INFRAS. Quelle: <bitte hier eingeben>

Fahrzeuggrößen

Sowohl beim RPV (53%) als auch beim Ortsverkehr (47%) werden rund die Hälfte der Linien mit Standardbussen betrieben. Die Anteile der Linien mit Gelenkbus liegt bei 25% (im RPV) bis 29% (im Ortsverkehr). Gleiches gilt für die Midibusse (18% RPV, 14% Ortsverkehr). Der Anteil Linien mit Kleinbussen ist bei beiden Sparten mit Anteilen unter 10% vergleichsweise klein.

Abbildung 9: Anzahl Linien nach Fahrzeuggrößen für RPV und Ortsverkehr



Grafik INFRAS. Quelle: <bitte hier eingeben>

Betriebskosten und Abgeltungen für Liniencluster nach Fahrzeuggrösse

Die Vollkosten sämtlicher Busleistungen des Regionalverkehrs (RPV) belaufen sich im Jahr 2019 auf knapp 1'200 Mio. CHF pro Jahr, die Abgeltungen für die entsprechenden Leistungen auf ca. 620 Mio. CHF/a, wovon je rund die Hälfte durch den Bund und die Kantone finanziert wird.

Tabelle 3: Vollkosten und Abgeltungen 2019 für die RPV-Linien (Vollerhebung)

	Vollkosten	Abgeltungen	Anteil Kanton	Anteil Bund	Kurs-Km	Anzahl Linien
	CHF/a	Total CHF/a	CHF/a	CHF/a	km/a	Stichprobe
Kleinbus	16'671'149	12'462'273	4'795'421	7'666'852	2'788'676	57
Midibus	66'163'801	41'481'311	17'741'967	23'739'344	8'561'545	100
Standardbus	599'989'456	340'339'342	160'905'032	179'434'310	93'823'392	678
Gelenkbus	496'123'405	219'307'046	120'497'908	98'809'138	71'520'018	262
Doppelstöcker	10'670'514	3'139'663	1'479'537	1'660'126	1'256'806	4
Total	1'189'618'326	616'729'635	305'419'865	311'309'770	177'950'436	1'101

Tabelle INFRAS. Quelle: Quelle BAV

Für den Ortsverkehr liegt keine Vollerhebung, sondern lediglich eine Stichprobe aus der durchgeführten Umfrage bei den Transportunternehmen. Diese Stichprobe umfasst Dieselbusleistungen, welche Betriebskosten von knapp 900 Mio. CHF pro Jahr aufweisen. Die Abgeltungen für die entsprechenden Leistungen liegen bei ca. 520 Mio. CHF, welche durch die Gemeinden und Kantone finanziert werden (Anteile aus der Umfrage nicht bekannt). Diese Stichprobe entspricht schätzungsweise rund 70–80% des gesamten Ortsverkehrs in der Schweiz.⁹

Tabelle 4: Vollkosten und Abgeltungen 2019 für die Ortslinien gemäss TU-Umfrage (Stichprobe)

	Vollkosten	Abgeltungen	Kurs-Km	Anzahl Linien
	CHF/a	CHF/a	km/a	Stichprobe
Kleinbus	21'485'598	20'206'883	3'138'837	44
Midibus	62'593'599	52'428'003	7'989'746	74
Standardbus	249'437'833	150'857'734	30'434'545	230
15-Meter-Bus	11'584'347	6'603'101	1'249'580	4
Gelenkbus	542'281'265	291'407'634	56'893'336	162
Doppelstöcker	8'809'283	5'099'392	1'223'717	3
Total	896'191'925	526'602'747	100'929'761	517

Tabelle INFRAS. Quelle: TU-Umfrage BFE/VöV 2020

⁹ Gemäss BFS-Statistik 'Kosten des motorisierten Strassenverkehrs' betragen im Jahr 2015 die Verkehrsmittelkosten (inkl. Infrastruktur) für die Autobusse in der Schweiz (Ortsverkehr und RPV zusammen) 2'300 Mio. CHF/a. Bei jährlichen Kosten der RPV-Linien von ca. 1'200 Mio. CHF liegen somit die Kosten für die Diesel-Ortsbuslinien in der Grössenordnung von 1'100 Mio. CHF/a.

3. Antriebssysteme und zukünftige Entwicklungen

3.1. Terminologie / Definitionen

Wir definieren die Technologien bzw. Technologiefamilien, die als alternative Antriebstechnologien gegenüber dem Dieselbus betrachtet werden, wie folgt:

- **Elektrobusse (E-Busse):** Busse, die ausschliesslich durch einen Elektromotor angetrieben werden:
 - **Batteriebusse:** Elektrobusse, deren Energiebedarf für die Fahrt aus einer Batterie gedeckt wird, die am Stromnetz geladen wird. Dazu gehören:
 - **Depotlader:** Busse, die typischerweise über Nacht während mehreren Stunden geladen werden,
 - **Gelegenheitslader (statisch):** Busse, die im Stillstand, typischerweise an Endhaltestellen, während mehreren Minuten geladen werden,
 - **Gelegenheitslader (dynamisch), auch IMC (in motion charging) oder Batterie-Trolleybus genannt:** Busse, die teilweise am Oberleitungsnetz fahren und während dieser Zeit eine Batterie, die auch fahrleistungsloses Fahren ermöglicht, laden.¹⁰
 - **Kombi-Lader:** Busse mit einer relativ grossen Batterie, die sowohl wie Depotlader als auch wie statische Gelegenheitslader geladen werden.
 - **Brennstoffzellenbusse:** Elektrobusse, deren Energiebedarf für die Fahrt aus einer Batterie gedeckt wird, die durch eine mitgeführte Brennstoffzelle geladen wird. Hier sind zwei Varianten denkbar:
 - **konventionelle Brennstoffzellenbusse:** Busse mit relativ kleiner Batterie, die nur zur Deckung der Leistungsspitzen und nicht als Energiespeicher eingesetzt wird,
 - **Plug-In-Brennstoffzellenbusse:** Busse mit einer grösseren Batterie, die am Stromnetz geladen wird, und einem Brennstoffzellensystem an Bord, das bei Bedarf die Batterie nachlädt.
- **Hybridbusse:** Busse, die sowohl über eine Batterie für den Antrieb und einen elektrischen Antriebsmotor verfügen als auch über einen Verbrennungsmotor. Der Verbrennungsmotor kann direkt als Antriebsmotor eingesetzt werden oder einen Generator antreiben, der wiederum die Batterie lädt.¹¹ Es sind auch Mischformen denkbar. Bei Hybridbussen unterscheiden wir:

¹⁰ Herkömmliche Trolleybusse beziehen den Strom für den Antrieb direkt aus der Fahrleitung und besitzen keine Batterie, die einen Fahrt ohne Oberleitung zulässt. Der Batterie-Trolleybus bezieht hingegen den Strom für den Antrieb ausschliesslich aus seiner Batterie, die während der Fahrt über die Oberleitung geladen wird (In-Motion-Charging). Dies erlaubt einerseits auch längere Streckenanteile ohne Oberleitung zu befahren. Andererseits ermöglicht diese Technologie ein effizienteres Energiemanagement. Mit dem SwissTrolley plus ist diese Technologie bereits erfolgreich umgesetzt. Das herkömmliche Trolleybus ist daher nicht weiter zu betrachten.

¹¹ Diese Variante könnte man auch als Elektrobus klassifizieren.

- konventionelle Hybridbusse, deren Batterie nicht am Stromnetz geladen wird,
- Plug-in-Hybridbusse, deren Batterie unter anderem am Stromnetz geladen werden.
- Busse mit Verbrennungsmotor. Dabei unterschieden wir nach der Technologie:
 - Selbstzünder: üblicherweise mit Diesel betriebene Busse. Künftig sind auch mit Benzin betriebene Selbstzünder am Markt zu erwarten.
 - Otto-Motoren: Typischerweise für den Betrieb mit Methan (CNG oder LNG) ausgelegte Busse; auch für den Benzinbetrieb möglich, aber bei Bussen nicht zu erwarten.

3.2. Antriebstechnologien

In diesem Kapitel dokumentieren wir zuerst die Auswahl der Antriebssysteme und Treibstoffe, die näher betrachtet werden sollen. Darauf folgen Beschreibungen der gewählten Kombinationen von Antriebstechnologie und Treibstoff mit Fokus auf heutige und erwartete künftige technische Eigenschaften und Einsatzbereiche. Die Kosten und Umweltaspekte der Busse mit verschiedenen Antriebstechnologien werden danach im Vergleich aller Technologien diskutiert.

3.2.1. Auswahl der zu betrachtenden Optionen

Wir starten mit einer Auslegeordnung aller Kombinationen von Antriebsoptionen und Treibstoffen, die im öffentlichen Busverkehr unter der Prämisse «energieeffizient – erneuerbar – emissionsarm¹²» heute und künftig in Frage kommen. Abbildung 10 stellt diese Kombinationen dar. Bei allen alternativen Technologien müssen zur Bestimmung von Umweltwirkungen und Kosten zusätzlich zur Antriebstechnologie die Art und die Herstellungspfade der Treibstoffe (Strom wird im Fall von Elektrobussen auch als Treibstoff bezeichnet) berücksichtigt werden. Grundsätzlich sind bei den Kohlenwasserstoffen fossile, biogene und synthetische Treibstoffe zu unterscheiden. Bei Biogenen Treibstoffen sind wiederum viele verschiedene Rohstoffe und Verarbeitungspfade denkbar, die sehr unterschiedlichen Umweltwirkungen und Kosten verursachen. Bei Wasserstoff ist sowohl die Herstellung aus Erdgas durch Dampfreformation (mit und ohne Abscheidung und Speicherung des anfallenden CO₂) als auch eine Produktion durch Elektrolyse von Wasser denkbar. Und der Strom zur Wasserstoffproduktion wie auch zum Laden der Batterien kann unterschiedlich erzeugt sein. Hintergrundinformationen zu erneuerbaren Treibstoffen sind im Annex A3 zu finden.

Aufgrund einer groben Bewertung werden zuerst die Optionen ausgeschlossen, welche die Kriterien «erneuerbar», «energieeffizient» und «emissionsarm» nicht oder nur ungenügend erfüllen. Aus den verbleibenden Optionen wurden, zusammen mit der Begleitgruppe, diejenigen

¹² energieeffizient bez. Primärenergiebedarf im Betrieb und Lebenszyklus, erneuerbar bez. Energieeinsatz und emissionsarm bez. Treibhausgasen im Lebenszyklus sowie Luftschadstoffen und Lärm im Betrieb.

für eine vertiefte Betrachtung ausgewählt, die bezüglich der drei genannten Kriterien sowie bezüglich betrieblicher Aspekte und Kosten das grösste Potenzial haben optimal abzuschneiden.

Fossile Treibstoffe und nicht-erneuerbarer Strom erfüllen offensichtlich das Kriterium der Erneuerbarkeit nicht. Dasselbe gilt für Wasserstoff, der mittels Dampfreformierung aus Erdgas gewonnen wird. Wenn bei dieser Produktion das anfallende CO₂ gefangen und darauf sicher gelagert wird (CCS; Carbon Capture and Storage), kann der produzierte Wasserstoff zwar als CO₂-neutral bezeichnet werden, aber die Basis ist immer noch fossiles Erdgas.

Abbildung 10: Übersicht und Auswahl der Antriebsoptionen und Treibstoffe

Auswahl Vertiefung Antriebsoptionen			Diesel			Methan			Wasserstoff			Strom	
			fossil	Bio	PtL (erneuerbarer Strom)	fossil	Bio	PtL (erneuerbarer Strom)	Dampfreformierung ohne CCS	Dampfreformierung mit CCS	Elektrolyse (erneuerbarer Strom)	nicht erneuerbar	erneuerbar
Elektrobusse	Batteriebusse	Depotlader											
		Gelegenheitslader (statisch)											
		Gelegenheitslader (dynamisch)											
	Brennstoffzellenbusse	Kombi-Lader											
konventionell													
	Plug-In												
Hybride	Selbstzünder	konventionell											
		Plug-In											
	Otto	konventionell											
		Plug-In											
Verbrennungsmotorbusse	Selbstzünder	Diesel											
		Benzin											
		Gas (Methan)											
	Otto	Gas (Methan)											
		Benzin											

technisch keine Option
 nicht erneuerbar
 nicht effizient
 Referenz
 soll im Detail betrachtet werden

Grafik INFRAS.

Busse mit konventionellen Verbrennungsmotoren verbrauchen zwischen 15 und 20% mehr Energie als vergleichbare Hybride. Die Mehrkosten für einen Hybridbusse liegen in einem vertretbaren Bereich und der Druck, der z.B. durch die EU aufgebaut wird, auch bei schweren Nutzfahrzeugen Effizienzsteigerungen zu erreichen, wird helfen, dass sich Hybride immer besser am Markt etablieren werden. Aufgrund dieser Überlegungen wurde beschlossen, für die Optionen mit Biotreibstoffen auf Hybridbusse zu fokussieren.

Die Herstellung von synthetischen flüssigen Treibstoffen (PtL; Power to liquid) weist eine Energieeffizienz von nur rund 40% auf. In Kombination mit einem Verbrennungsmotor werden noch rund 11% der total eingesetzten Energie in Bewegung umgesetzt. Obwohl PtL aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen wird, wird im Annex A3.2 noch kurz auf die Herstellung und die Nutzung von «Überschussstrom» eingegangen.

3.2.2. Batteriebusse

Batterien

In der vorliegenden Studie umfasst der Begriff «Batterie» immer das ganze System, das sich aus den eigentlichen elektrochemischen Zellen, einem Batteriemanagementsystem, einer Kühlung und einer Verpackung und Kontaktierung zusammensetzt. Bei Batterien für den Antrieb von Bussen handelt es sich heute ausschliesslich um Lithium-Batterien. Für Depotlader kommen heute entweder Lithium-Eisenphosphat (LFP) oder Lithium-Nickel-Mangan-Coabl- (NMC) Batterien mit Graphitanoden zum Einsatz. Für Gelegenheitslader kommen entweder die NMC-Batterien mit Titanat-Anode (LTO) zum Einsatz oder auch die NMC-Batterien mit Graphitanoden. Hintergrundinformationen zu den Batterien (Zusammensetzung, Energie- und Leistungsdichten, Preise, Recyclingoptionen sowie Umwelt- und Kritikalitätsaspekte in der Produktion) sind im Annex A1 zusammengestellt.

Energieeffizienz

Der Antrieb von Elektrobussen ist sehr effizient. Mehr als 70% der Energie, die in der Batterie gespeichert ist, kann in Bewegung umgewandelt werden. Berücksichtigt man auch die Energieverluste beim Laden der Batterie (ca. 15%), werden immer noch 60% der Energie, die der Batterie zugeführt wird, in Bewegung umgesetzt. Kommt der Ladestrom bei einem Batteriebus aus einer erneuerbaren Quelle übers Stromnetz zum Bus, entstehen dabei Übertragungs- und Umwandlungsverluste von insgesamt rund 12%. Damit kann in einem Batteriebus rund 53% des erzeugten Stroms in Bewegung umgewandelt werden.

Da der Antrieb aber so effizient ist, fällt praktisch keine nutzbare Abwärme an. Batteriebusse müssen also aktiv beheizt werden, was entweder mit Strom aus der Batterie oder durch eine diesel- oder gasbetriebene Zusatzheizung erfolgt. Auch die Lüftung und gegebenenfalls Kühlung des Fahrzeuges braucht Energie aus der Batterie. Moderne Fahrzeuge setzen auf Wärmepumpen und effiziente Heiz- und Kühlsysteme. Trotzdem verursachen diese Nebenverbraucher einen relevanten Teil des totalen Energieverbrauchs der Fahrzeuge und reduzieren damit die Reichweite des Fahrzeuges an besonders kalten und warmen Tagen.

Verbesserungspotenzial gibt es einerseits bei der Leistungselektronik im Fahrzeug und vor allem bei den Ladegeräten. Mit den besten vorhandenen Technologien bei diesen Komponenten könnte die WtW-Effizienz um 10 bis 20 Prozentpunkte erhöht werden. Bei den Nebenverbrauchern für Heizung, Lüftung, Klima, Licht, etc. wurden in den letzten Jahren schon enorme Fortschritte erzielt. Bei Fahrzeugen, die nicht mit den besten vorhandenen Technologien ausgerüstet sind, sind signifikante Einsparungen beim Energiebedarf dieser Verbraucher möglich. Aber auch der aktuelle Stand der Technik hat noch Entwicklungspotenzial.

3.2.2.1. Depotlader

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

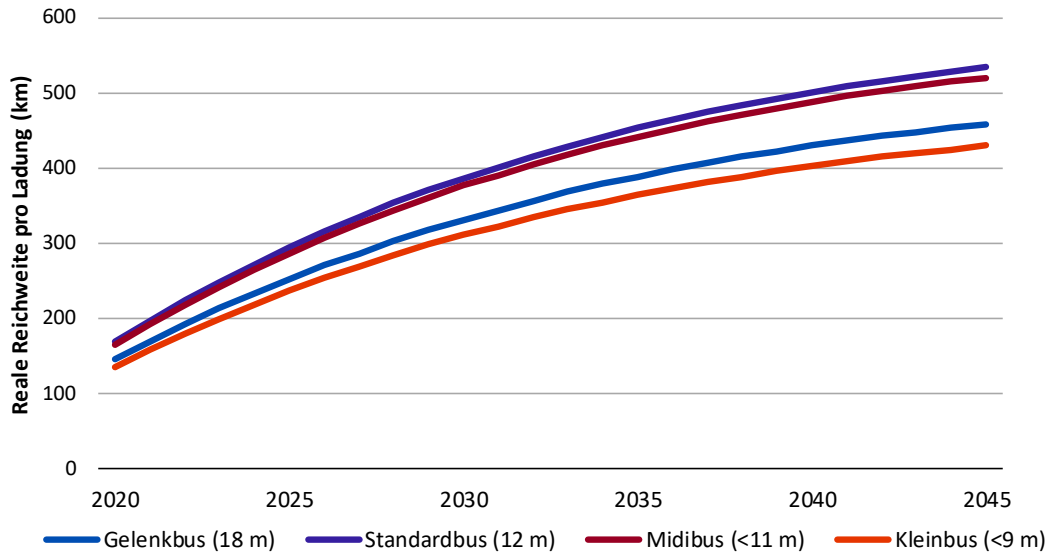
Depotlader von verschiedenen Herstellern sind seit mehreren Jahren auf dem Markt. Inzwischen haben auch die grossen Busersteller für die nächsten Jahre serienreife Modelle angekündigt. Da Batterien (noch) sehr teuer und schwer sind, sind Depotlader heute meistens mit bis zu 600 kWh Batteriekapazität (ca. 4–5 Tonnen) auf dem Markt. Mit den Prognosen bezüglich Verbesserungen der Batterien wird den Depotladern von vielen Experten eine grosse Zukunft vorhergesagt.

In dieser Studie gehen wir für Normal- und Gelenkbusse von einer über die Jahre konstanten Batteriemasse von 3 bis 4 Tonnen aus. Aufgrund der Batterieentwicklung nimmt die Kapazität mit der Zeit zu, was bedeutet, dass ein im Jahr 2020 beschaffter Bus eine deutlich geringere Reichweite hat als ein in den Jahren 2040 oder 2050 beschaffter Bus (vgl. Abbildung 11).

Depotlader benötigen keine Ladeinfrastruktur auf der Strecke. Busse werden im Depot mit einer Leistung von typischerweise 150 kW pro Bus geladen. Für Gelenk- und Normalbusse bedeutet das heute (bei 450–600 kWh Batteriekapazität) zwischen 4 und 6 Stunden Ladezeit. Steigt die Batteriekapazität in Zukunft, wie prognostiziert, auf über 1000 kWh an, wird gegebenenfalls eine höhere Ladeleistung pro Bus benötigt.

Wir gehen davon aus, dass ein Depot für Depotlader über eine Anschlussleistung von 150 kW pro Ladestation verfügt. An den typischen Standorten von Busdepots in Gewerbe-/Industriegebieten ist i.d.R. eine Anschlussleistung von 5 MW möglich. Das bedeutet, dass rund 30 Busse gleichzeitig geladen werden können. In Zukunft muss man aber damit rechnen, dass ab 20 Depotlader pro Depot eine höhere Anschlussleistung erforderlich wird. Höhere Anschlussleistungen lösen in den Depots Infrastrukturanpassungen verbunden mit entsprechenden Kosten aus (Grössenordnungen zu den Kosten für die Ladeinfrastrukturen sind dem Annex 2 zu entnehmen). Auf jeden Fall ist in einem Depot mit einer grösseren Depotlader-Flotte ein intelligentes Lademanagement vorzusehen, um den Leistungsbedarf zu minimieren und das Aufladen der Busse zu optimieren.

Abbildung 11: Entwicklung der realen Reichweite von Batteriebusen mit Depotladekonzept



Bemerkung: Unterstellte Annahmen zum spezifischen Energieverbrauch (Durchschnitt): Gelenkbus 2 kWh/km, Standardbus 1.5 kWh/km, Midibus 1.1 kWh/km, Kleinbus 0.8 kWh/km

Grafik: INFRAS, Quellenangaben und Details siehe Annex 1

3.2.2.2. Gelegenheitslader statisch

Gelegenheitslader sind batterieelektrische Busse, die schnell geladen werden – typischerweise an Endhaltestellen. Dafür brauchen diese Busse relativ kleine, schnellladefähige (also leistungs-optimierte) Batterien (s. Annex A1.1). In dieser Studie gehen wir von Batterien aus, die eine theoretische Reichweite von etwa 15–30 km pro Ladung erlauben. Mit steigender Batteriekapazität und sinkenden Kosten über die Zeit wird ein Gelegenheitslader auf dem neusten technischen Stand im Jahr 2040 keine grössere Reichweite aber eine leichtere und vor allem günstigere Batterie haben als der vergleichbare Bus im Jahr 2020.

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

Zwischenladung gefahren werden. Danach muss aber umso mehr Zeit an den Endhaltestellen zur Verfügung stehen, um die Batterien wieder ganz zu laden.

Neben einer Ladeinfrastruktur im Depot brauchen Gelegenheitslader auch Schnellladestationen mit 450 kW Ladeleistung an einer oder an mehreren Endhaltestellen. An diesen Stationen stellt der Bus z.B. mittels Pantographen eine Verbindung zur Ladestation her und wird während einigen Minuten geladen. Aufgrund der kleinen Batterien stellt selbst eine grosse Gelegenheitslader-Flotte keine besonders hohe Anforderung an die Ladeleistung im Depot. Eine Leistung von rund 450 kW an den Endhaltestellen ist hingegen beträchtlich. Sie entspricht etwa der Anschlussleistung von 5 bis 10 Einfamilienhäusern. Auf Linien mit langen Standzeiten an den Endhaltestellen (über 10 Minuten) könnte auch mit geringer Leistung geladen werden. Eine solche Leistung kann im Allgemeinen an Endhaltestellen zur Verfügung gestellt werden. Sehr entlegene Standorte könnten allenfalls problematisch sein. Schwierig kann es auch werden, wenn an zentralen Stellen viele Gelegenheitslader gleichzeitig laden müssen. Solche Situationen dürften aber am ehesten bei Bahnhöfen vorkommen, wo i.d.R. bereits eine sehr leistungsfähige Stromversorgung besteht.

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

3.2.2.3. Kombi-Lader

Während die Namen Depotlader und Gelegenheitslader im Kontext von Elektrobussen häufig verwendet werden, ist die Bezeichnung «Kombi-Lader» nicht allgemein verständlich. Wir haben diesen Begriff gewählt, um einen batterieelektrischen Bus zu bezeichnen, der Eigenschaften des Depotladers mit jenen des statischen Gelegenheitsladers kombiniert. Kombi-Lader sind eigentlich Depotlader mit einer grossen, energieoptimierten Batterie, die aber zusätzlich an Endhaltestellen nachgeladen wird. Dies kann theoretisch über eine manuell hergestellte Stecker-Verbindung erfolgen, wie das von Postauto 2019 auf der Linie 342 Sarnen – Alpnach mit einem Standardbus getestet wurde. Alternativ kann die Ladung analog zum Gelegenheitslader über einen Pantographen erfolgen.

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

Kombi-Lader brauchen eine leistungsfähige Ladeinfrastruktur im Depot und typischerweise an einer Endhaltestelle. Die Anschlussleistung an der Endhaltestelle kann wie für Gelegenheitslader bei 450 kW liegen, kann aber je nach Situation auch deutlich geringer sein.

3.2.2.4. Gelegenheitslader dynamisch (IMC, Batterietrolleybus)

Moderne Trolleybusse verfügen über eine Traktionsbatterie, die ähnlich spezifiziert ist wie die Batterie eines Gelegenheitsladers. Diese Batterien werden während der Fahrt über das Oberleitungsnetz geladen und erlauben es, den Bus auf rund 40 - 60% der Strecke¹³ ohne Oberleitung zu fahren. Der Anteil an Oberleitung ist stark abhängig vom Streckenprofil und der resultierenden Länge eines zusammenhängenden fahrleistungslosen Abschnitts sowie der Nachlademöglichkeit im Falle von Umleitungen oder eines Teilstreckenbetriebs. Mit dem Einsatz des Batterietrolleybusses können Kosten für die Oberleitung gespart und eine gewisse Flexibilität im Betrieb gewonnen werden. Die Batterie erweist sich ebenfalls als vorteilhaft beim Rekuperieren der Bremsenergie. Während der klassische Trolleybus diese Energie ins Oberleitungsnetz einspeist und die Energie nur genutzt werden kann, wenn ein anderer Bus im Netz sie gleichzeitig brauchen kann, speichern die modernen Trolleybusse die Energie in der eigenen Batterie und nutzen sie später selbst wieder.

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

3.2.3. Brennstoffzellenbusse

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

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

Wie bei Batteriebussen kann auch bei Brennstoffzellenbussen rund 70% der Energie von der Batterie in Bewegung umgesetzt werden. Die Ladeverluste für die Batterie liegen eher tiefer als bei Batteriebussen. Grund dafür ist, dass die Batterien in Brennstoffzellenbussen typischerweise nicht ganz vollgeladen werden und dass die Ladeeffizienz für die letzten 10 bis 20%

¹³ Um als Trolley zugelassen zu werden, muss der Bus allerdings mehr als 50% der Strecke an der Oberleitung fahren.

wegen dem Ladungsausgleich zwischen den Zellen in der Batterie geringer ist als im tieferen Ladungsbereich. Ein grosser Energieverlust findet hingegen statt bei der Umwandlung von Wasserstoff zu Strom in der Brennstoffzelle. Dieser Prozess erreicht einen durchschnittlichen Wirkungsgrad von rund 65%. Damit wird ca. 40% der Energie, die im Wasserstoff gespeichert ist, in Bewegung umgewandelt. Da aber schon bei der Herstellung und Komprimierung des Wasserstoffes rund 45% der Energie verloren gehen, wird bei Brennstoffzellenfahrzeugen nur etwa 22% des ursprünglich erzeugten Stroms in Bewegungsenergie umgewandelt. Damit liegt der Wirkungsgrad eines Brennstoffzellenbusses unter demjenigen eines herkömmlichen Dieselmotors. Besonders bei der Effizienz der Brennstoffzelle wird eine kontinuierliche Verbesserung erwartet, trotzdem wird der Energieverbrauch von Brennstoffzellenbussen immer deutlich über dem von Batteriebussen liegen.

In der Schweiz gibt es derzeit nur einzelne Wasserstofftankstellen. Die Anschaffung von Brennstoffzellenbussen würde demnach voraussetzen, dass mindestens eine Wasserstofftankstelle in der Nähe der Busdepots gebaut wird. Der Wasserstoff könnte zugekauft oder direkt vor Ort produziert werden. Wenn es dort ein geeignetes Kraftwerk gibt, könnte das Stromnetz und die entsprechenden Kosten und Energieverluste umgangen werden. Sonst müsste die Anlage mit teurerem Strom vom Netz betrieben werden.

Brennstoffzellenbusse wurden in einigen Pilotprojekten getestet. Die Kosten der Wasserstoffproduktion und der Brennstoffzelle selbst, vor allem auch im Zusammenhang mit der noch ziemlich kurzen Lebensdauer, waren bisher das vielleicht grösste Hindernis für einen breiteren Einsatz. Hyundai hat angekündigt bis 2025 eine Serie von 1'600 Brennstoffzellen-LKW in der Schweiz in Verkehr zu setzen.¹⁴ Auch haben verschiedene Bushersteller in Europa und Asien inzwischen für 2020 erste Kleinserien in Aussicht gestellt.

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

Zusätzliche Informationen zu den Brennstoffzellen und zur Produktion von Wasserstoff für Brennstoffzellenbusse sind in Annex A2 und A3.2 zusammengestellt.

3.2.4. Hybride und Plug-In-Hybrid

Hybride können technisch sehr unterschiedliche Fahrzeuge sein. Gemeinsam ist allen, dass sie einen Elektroantrieb und eine Traktionsbatterie haben. Zudem verfügen sie über einen Energiewandler, der einen chemischen Treibstoff in mechanische oder elektrische Energie umwandelt. Dieser Energiewandler kann ein Verbrennungsmotor sein, der direkt eine Achse antreibt.

¹⁴ <https://www.news.hyundai.ch/einzigartiges-wasserstoff-okosystem-mit-grunem-wasserstoff-und-hyundai-h2-elektro-nutzfahrzeugen-startet-ab-2020-in-der-schweiz>

Es kann sich auch um einen Verbrennungsmotor handeln, der einen Generator zum Laden der Batterie antreibt oder um eine Brennstoffzelle, die ebenfalls Strom zum Laden der Batterie erzeugt. In dieser Studie betrachten wir Brennstoffzellenfahrzeuge allerdings separat und zählen diese ausdrücklich nicht zur Kategorie Hybride. Als Verbrennungsmotoren für die Hybride betrachten wir in dieser Studie Selbstzünder mit Biodiesel sowie Otto-Motoren mit Biogas. Natürlich können Hybride auch mit fossilen Treibstoffen betrieben werden, doch erfüllen sie dann die Voraussetzung «erneuerbar» nicht. Zusätzliche Informationen zu erneuerbaren Treibstoffen sind im Annex A3 zusammengestellt.

Bei Plug-in-Hybriden kann die Traktionsbatterie am Stromnetz aufgeladen werden, bei den einfachen Hybriden wird die Batterie ausschliesslich während der Fahrt geladen.

Hybride können, wie Elektrobusse, Bremsenergie rekuperieren und in der Batterie speichern. Diese Energie steht dann beim Anfahren wieder zur Verfügung. Das trägt dazu bei, dass Hybride im Betrieb deutlich energieeffizienter sind als klassische Dieselmotoren. Ebenfalls effizienzsteigernd ist der Umstand, dass der Verbrennungsmotor in Hybriden bei einer ziemlich konstanten Last nahe am energetischen Optimum betrieben werden kann. Das ist möglich, weil der Elektromotor Lastspitzen abdeckt und Leistung, die nicht zum Vortrieb benötigt wird, der Batterie zugeführt werden kann.

Wie bei batterieelektrischen Bussen bestimmt die Grösse der Batterie auch bei Plug-in-Hybriden, zusammen mit der Frequenz und Dauer der Ladevorgänge am Netz, wie gross der Anteil des Betriebs mit Netzstrom sein wird.

Heute verfügbare Plug-in-Hybrid-Busse verfügen über eine relativ kleine Batterie (50–100 kWh), die jeweils im Depot geladen wird. Das führt dazu, dass damit nur ein sehr kleiner Teil der Fahrleistung (20–30 km) mit Strom vom Netz erbracht werden kann. Denkbar sind auch schnellladefähige Fahrzeuge, die an Gelegenheitsladestationen nachgeladen werden können, sowie Depotlader-Hybride mit grösseren Batterien. Mit diesen beiden Systemen kann ein hoher Anteil der Fahrleistung mit Netzstrom erbracht werden. Der Dieselmotor wäre im Grenzfall eigentlich nur noch ein Notaggregat, das aber den Fahrzeugpreis und die Wartungskosten erhöht und Nutzlast kostet.

Plug-in-Hybride entwickeln ihre Stärke aber in Anwendungen, in denen oft die Batteriekapazität ausreicht und der Verbrennungsmotor nicht benötigt wird, die aber auch regelmässig grössere Tagesfahrleistungen erfordern. Bei Bussen im Linieneinsatz sind solche Anforderungen eher selten. Entsprechend dürften Plug-in-Hybride nur in wenigen Fällen die technisch optimale Lösung darstellen

3.2.5. Fahrzeugkosten im Vergleich

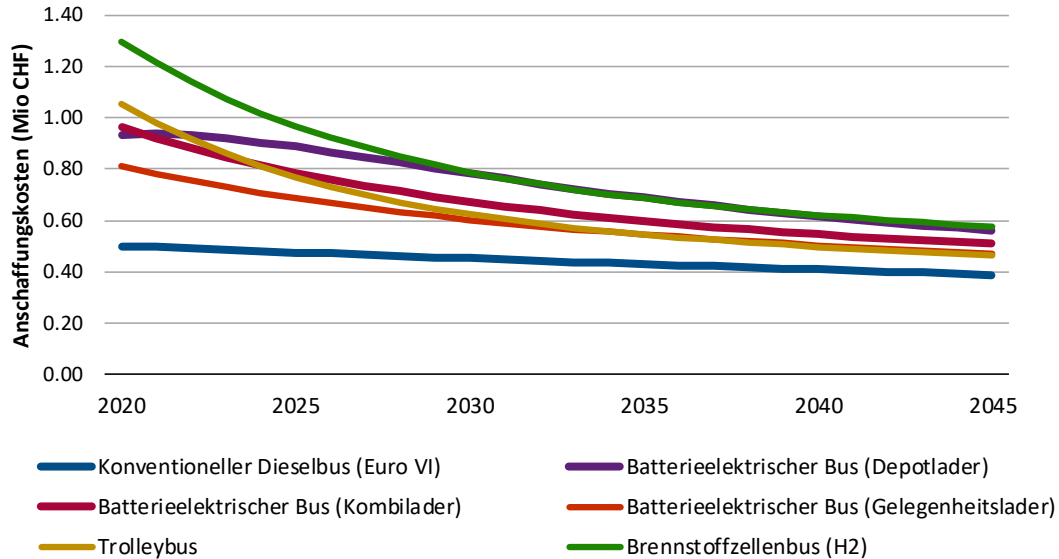
Die Kosten für Fahrzeuge mit den verschiedenen Antrieben variieren in Realität recht stark. Gründe dafür können unterschiedliche Hersteller, Ausstattungen und / oder Marktsituationen sein. Die erwartete Entwicklung der Kosten hängt stark von der Antriebstechnologie ab. Konventionelle Dieselbusse sind lang etabliert und breit aufgestellt, sodass nur noch wenig Kostenoptimierungspotenzial besteht. Bei den neueren Technologien hingegen sind noch signifikante Lern- und Skaleneffekte möglich, die zu markanten Preisreduktionen führen werden.

Um zu sinnvollen generischen Aussagen zu kommen, werden die Fahrzeugpreise in dieser Studie modelliert. Das Modell nimmt die Preise von Dieselbussen verschiedener Grössen als Basis. Für die anderen Antriebstechnologien werden, basierend auf heutigen Marktpreisen, Zuschläge zu diesem Basispreis definiert. Bei Elektrobussen beinhalten diese Aufpreise noch keine Batterien und / oder Brennstoffzellen. Diese werden separat berücksichtigt. Damit kann im Modell sehr einfach die Batteriegrösse eines Busses verändert werden.

Die Kostenentwicklung der Busse wird als Entwicklung der Basiskosten und der Aufpreise abgebildet. So wird berücksichtigt, dass zum Beispiel die spezifischen Batteriekosten (pro Energieinhalt) rascher sinken werden als die Kosten für einen Dieselbus oder für den Elektroantrieb. Abbildung 12 zeigt am Beispiel eines Gelenkbusses, wie sich die Anschaffungskosten der unterschiedlichen Technologien entwickeln. Die Modellparameter für alle Antriebstechnologien sind im Annex A5 aufgeführt.

Abbildung 12: Anschaffungskosten der Antriebsoptionen im Zeitverlauf

Gelenkbus (18 m)



Beim Depotlader (violett) ist ein leichter Anstieg der Kosten bis 2025 zu beobachten. Das hat damit zu tun, dass bei Depotladern davon ausgegangen wird, dass sich die Batteriekapazität aufgrund der erwarteten Entwicklungen bis 2025 noch erhöht. Im Modell werden eine angestrebte Batteriekapazität sowie eine maximale Batteriemasse vorgegeben. Bei den Bussen mit grossen Batterien ist heute noch die Batteriemasse das beschränkende Kriterium. Die angestrebte Kapazität wird also noch nicht erreicht. Mit der Verbesserung der Energiedichte der Batterien über die Zeit wird die Kapazität bei der maximalen Batteriemasse immer grösser, bis sie irgendwann den angestrebten Wert erreicht. Ab diesem Zeitpunkt wird die Kapazität konstant gehalten und die Masse wird jedes Jahr etwas kleiner.

Grafik INFRAS.

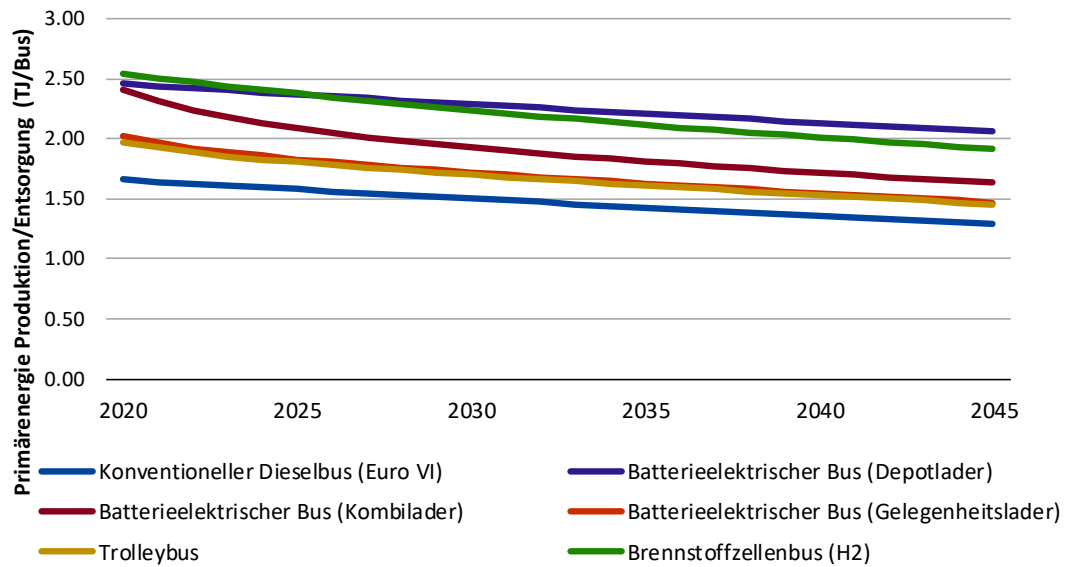
3.2.6. Umweltaspekte der Fahrzeugherstellung im Vergleich

Die Umweltaspekte der Fahrzeugherstellung und -entsorgung werden auf Basis der Masse von Bus, die auf Masse von Glider¹⁵, Antriebstrang und Batterie aufgeteilt ist, berechnet. Dazu werden Emissionsfaktoren für die Herstellung und Entsorgung der Komponenten aus der ecoinvent Datenbank (v3.6) und aus spezifischen Ökobilanzen, die wiederum Hintergrunddaten aus ecoinvent beziehen, verwendet. Die verwendeten Quellen sind im Annex A1.1 zusammengestellt. Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen die entsprechenden Ergebnisse im Zeitverlauf. Die Entwicklung kommt vollständig durch Gewichtsreduktion bei den Fahrzeugen und Batterien zustande. Die Emissionsfaktoren pro km Komponente werden als konstant angenommen.

¹⁵ Als Glider bezeichnen wir gemäss Notter et al 2010 den Teil der Fahrzeuge, die prinzipiell unabhängig von der Antriebstechnologie sind. Der Glider enthält z.B. das Fahrwerk, die Karosserie, der Fahrgastraum, etc.

Abbildung 13: Primärenergiebedarf der Herstellung und Entsorgung der Antriebsoptionen im Zeitverlauf

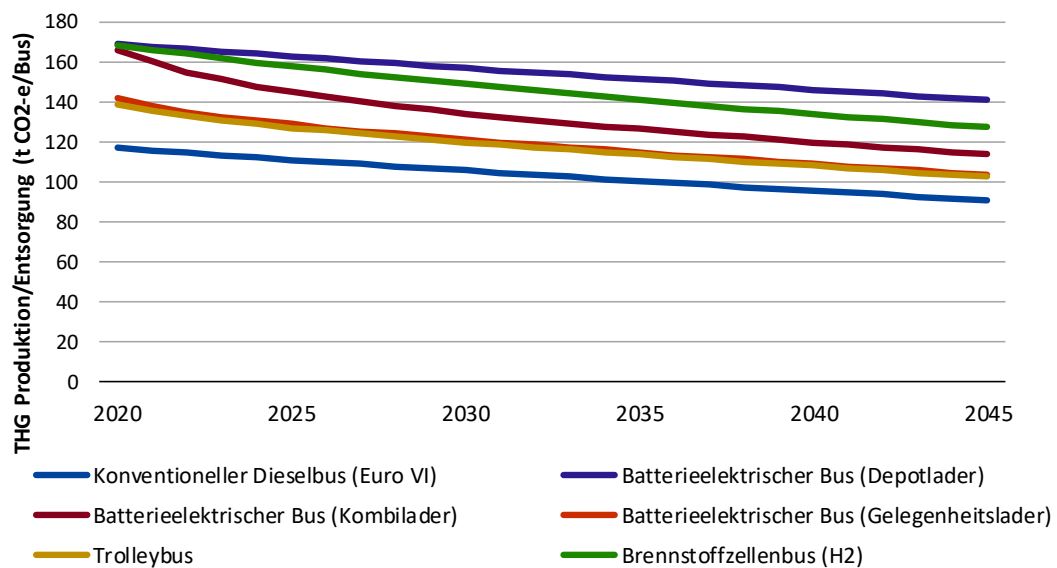
Gelenkbus (18 m)



Grafik INFRAS.

Abbildung 14: Treibhausgasemission der Herstellung und Entsorgung der Antriebsoptionen im Zeitverlauf

Gelenkbus (18 m)



Grafik INFRAS.

3.3. Technische Einsatzpotenziale in der Schweiz

Gemäss Beschluss an der letzten Begleitgruppensitzung werden folgende nicht fossile Antriebsoptionen weiter vertieft:

- E-Bus mit Depotladung
- E-Bus mit Gelegenheitsladung statisch entlang Strecke
- E-Bus als Kombilader
- Batterie-Trolleybus
- E-Bus mit Brennstoffzelle konventionell oder als Plug-In
- Biodiesel-Bus konventionell oder Plug-In
- Biogas-Bus konventionell

Einschätzung aus technischer und betrieblicher Sicht

Diese Optionen werden im Folgenden bezüglich ihrem technisch-betrieblichen Einsatzpotenzial diskutiert. Aus unserer Sicht wichtig ist, dass nicht nur die rein technischen Aspekte der Antrieboption beurteilt wird, denn die oben erwähnten Optionen sind grundsätzlich technisch alle möglich. Je nach betrieblicher Einsatzsituation stossen sie aber an Grenzen (beispielsweise aufgrund zu geringer Reichweiten oder fehlenden Ladezeiten an den Endhaltestellen). Bereits auch mit betrachten möchten wir erste Überlegungen zu den Infrastrukturkosten bzw. deren Verhältnismässigkeit in verschiedenen Einsatzfeldern.

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Möglichkeiten und Grenzen der verschiedenen Optionen aus technisch-betrieblicher Sicht:

Antriebstechnologie	Möglichkeiten	Grenzen
E-Bus mit Depotladung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ im Orts- und Regionalverkehr einsetzbar ▪ Hohe betriebliche Flexibilität im Rahmen der möglichen Reichweite, weil unabhängig von Ladeinfrastruktur entlang der Strecke, u.a. auch für Ersatzbetriebe oder bei Sonderanlässen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reichweiten im kurz-/mittelfristigen Horizont noch beschränkt. Heute sind Reichweiten um die 150 km ohne Nachladung möglich (ohne die Batterie zu stark zu beanspruchen und damit die Lebensdauer zu senken); längerfristig (2030/35) sind Reichweiten von 350-400km zu erwarten. ▪ Hohe Anschlussleistungen in den Depots. ▪ Limitierte Einsatzbarkeit im Nacht- oder 24h-Vollbetrieb aufgrund der Nachladezeiten.

Bemerkungen zum Depotlader:

- Die Reichweiten der Depotlader hängen u.a. auch vom Energieverbrauch der Nebenaggregate ab, insbesondere für Heizung/Lüftung/Klima. Die oben (bzw. auf der folgenden Seite)

ausgewiesenen Reichweiten sind im Kontext absehbarer Effizienzverbesserungen in diesem Bereich konservativ angenommen.

- Dimensionierung der Reichweiten: Es stellt sich die Frage, ob man hierbei jeweils auf die kältesten Tage abstützt, oder ob an diesen (einzelnen) sehr kalten Tagen ein Fahrzeugaustausch in Kauf genommen werden kann. Hierbei sind je nach Region die unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse zu berücksichtigen (z. Bsp. Linien im Mittelland oder im Berggebiet). Als Alternative zum Ansatz «Fahrzeugaustausch» kommen für die kältesten Tage auch thermische Zusatzheizsysteme in Frage.

Antriebstechnologie	Möglichkeiten	Grenzen
E-Bus mit Gelegenheitsladung statisch entlang Strecke	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Im Orts- und Regionalverkehr einsetzbar. ▪ Geeignet für Linien mit ausreichenden Endaufenthaltszeiten zum Nachladen der Batterien (Richtwerte zu den Ladezeiten siehe unten) ▪ Grundsätzlich auch Zwischenladungen an Zwischenstationen möglich (analog System TOSA in Genf); während bei Endhaltestellen-Ladestationen i.d.R. von Ladeleistungen von 450 kW ausgegangen wird, benötigen solche Zwischenladestationen höhere Ladeleistungen um lange (für die Kunden unattraktive) Haltestellenaufenthaltszeiten zu vermeiden. In diesem Fall spricht man von sog. Flash-Ladungen (ca. 30 Sek. mit 600 kW laden, was Energie für ca. 1 km Fahrt ermöglicht). 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr beschränkte Reichweiten pro Ladung (20 – 30 km/Ladung). ▪ Zur Sicherung der Fahrplanstabilität sind zusätzlich zu den Ladezeiten Restwendezeiten zur Sicherstellung der Betriebsqualität/Anschlusssicherung erforderlich. ▪ Fehlen solche Restwendezeiten, löst diese Antriebstechnologie zusätzliche Busumläufe mit entsprechenden Kostenfolgen aus. ▪ Weil aus wirtschaftlichen Gründen die Angebot i.d.R. auf möglichst kurze Wendezeiten ausgelegt sind, ist das Einsatzpotenzial grundsätzlich beschränkt. ▪ Bei Angebotsveränderungen (z. Bsp. Linienverlängerungen/-verkürzungen oder Taktverdichtungen) könnte Konzept nicht mehr funktionieren. ▪ Ein System mit Zwischenladung à la TOSA benötigt Ladestationen an zahlreichen Haltestellen, was die Lösung sehr teuer macht.

Die folgende Tabelle zeigt die notwendigen Ladezeiten für Standardbuslinien bei Nachladung an den Endhaltestellen in Abhängigkeit der Linienlänge sowie der Situation, ob nur einseitig oder an beiden Linienenden geladen werden kann.

Linienlänge	Grobe Richtwerte zur Ladezeit für Standardbusse an Endhaltestelle bei 450 kW-Ladeleistung	
	An beiden Linienenden Laden	Nur an einem Linienende Laden
5 km	2 - 3 Minuten	4 - 5 Minuten
15 km	4 - 5 Minuten	8 - 10 Minuten
25 km	6 - 8 Minuten	12 - 15 Minuten

Angenommener Energiebedarf für Standardbusse: 1.5 bis 2 kWh/km; die Ladezeiten von Gelenkbussen sind infolge des höheren Energiebedarfs länger

Antriebstechnologie	Möglichkeiten	Grenzen
E-Bus als Kombilader (Depotladung und <u>statisches</u> Nachladen entlang Strecke)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Im Orts- und Regionalverkehr einsetzbar. ▪ Geeignet für Linien mit ungenügenden Wendezeiten zum Nachladen während der Hauptverkehrszeiten, jedoch mit grosszügigen Wendezeiten in den Nebenverkehrszeiten, die ein kontinuierliches Nachladen ermöglichen. ▪ Die Batteriegrösse richtet sich nach dem Energiebedarf der Anzahl Umläufe während der Hauptverkehrszeit, für welche ein genügendes Nachladen an der Endhaltestellen nicht möglich ist. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entsprechende Spezial-Situation muss gegeben sein (wie z. Bsp. beim Pilotversuch auf der Linie 17 von Bernmobil). ▪ Bei Angebotsveränderungen (z. Bsp. Linienverlängerungen/-verkürzungen oder Taktverdichtungen) könnte Konzept nicht mehr funktionieren.

Antriebstechnologie	Möglichkeiten	Grenzen
E-Bus mit Gelegenheitsladung <u>dynamisch</u> entlang Strecke (« Batterie-Trolleybus »)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geeignet im Ortsverkehr bei dichten Taktfrequenzen ▪ Der Batterie-Trolleybus hat (gegenüber dem herkömmlichen Trolleybus) den Vorteil, dass er längere Abschnitte fahrleitunglos befahren kann, was ihn flexibler macht bei der Angebotsgestaltung, aber auch bei Betriebsstörungen/Streckenunterbrüchen. ▪ Ein Vorteil beim Batterie-Trolleybus ist die Möglichkeit für Doppelgelenkbuss-Einsatz (zwar theoretisch auch bei anderen Antriebsformen möglich, aber noch wenig praktiziert) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sehr beschränkte Reichweiten pro Ladung (20 – 30 km/Ladung). ▪ Im Regionalverkehr nicht geeignet, bzw. unwirtschaftlich, weil lange Linien und weniger dichte Angebote (und folglich teure Infrastruktur).

Bemerkungen zum Batterie-Trolleybus:

Der Batterie-Trolleybus mit dynamischer Streckenladung ist aufgrund aktueller Erfahrungen mit dem Swisstrolley plus für Einsatzfelder (wirtschaftlich) interessant, wo bereits ein Oberleitungsnetz besteht und mitbenutzt werden kann. Folgende Richtwerte gelten hierzu:

- Für einen zuverlässigen Betrieb sollte ca. 50-60% der Strecke mit Oberleitung ausgerüstet sein; je nach Situation sind allenfalls auch geringere Anteile möglich.
- Sind von der erforderlichen Oberleitungsnetzlänge bereits rund 50% vorhanden, ist das Batterie-Trolleybus-Konzept wirtschaftlich interessant.
- Das bestehende Leitungsnetz muss die zusätzliche Leistung für die zusätzlichen Busse bringen bzw. einfach verstärkt werden können.
- Im Rahmen dieser Studie werden nur Situationen betrachtet, bei welchen der Batterie-Trolleybus Dieselbuslinien ersetzt, der Ersatz von «alten» Trolleybussen durch moderne Batterie-Trolleybusse hingegen nicht.

Antriebstechnologie	Möglichkeiten	Grenzen
E-Bus mit Brennstoffzelle konventionell oder als Plug-In	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Im Orts- und Regionalverkehr einsetzbar. ▪ Vergleichbare Reichweiten wie mit Dieselbus möglich und damit maximale betriebliche Flexibilität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Infrastruktur für Wasserstoff-Betankung teuer und logistisch aufwendig; Verfügbarkeit von H₂ aus Elektrolyse (damit erneuerbar).
Biodiesel-Bus konventionell oder Plug-In	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dito Brennstoffzelle 	
Biogas-Bus konventionell	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dito Brennstoffzelle 	

Übersicht

Die folgende Tabelle zeigt die Einschätzung der verschiedenen Antriebsoptionen aus der rein technischen und auch aus der betrieblichen Sicht. Wie bereits einleitend gesagt, ist der Einsatz aller sieben Antriebsoptionen sowohl im RPV als auch im Ortsverkehr rein technisch möglich. Ausnahme bildet der Batterie-Trolleybus, der aufgrund der hohen Investitionen in ein Grundnetz für die Regionallinien nicht geeignet ist. Für Agglomerationslinien, welche aus Städten mit Trolleybusnetz hinausfahren, stellt der Batterie-Trolleybus jedoch sehr wohl eine Option dar. Betrachtet man das betriebliche Einsatzpotenzial, lässt sich folgendes aussagen:

- Die Einsatzmöglichkeiten des E-Bus mit Depotladung sind abhängig von der geforderten Tageseinsatzweite. Hier ist das kurz-/mittelfristige Einsatzpotenzial noch beschränkt. Langfristig wird aber der Depotlader Reichweiten von 350–400km ohne Nachladen abdecken können.
- Die Einsatztauglichkeit des E-Bus mit Gelegenheitsladung an den Endhaltestellen hängt von den spezifischen Gegebenheiten einer Linie ab. Da i.d.R. nicht genügend Wendezeiten zum Nachladen vorhanden sind (ohne die Fahrplanstabilität der Linie zu gefährden), sind die Einsatzmöglichkeiten beschränkt bzw. löst diese Antriebsoption zusätzliche Fahrzeugumläufe und damit zusätzliche Fahrzeug- und vor allem Fahrpersonalkosten aus (die fahrpersonalkosten machen in der Regel rund 50–60% der Linienkosten aus). Einschränkend für den statischen Gelegenheitslader wirkt sich auch der Aspekt aus, dass aufgrund der sehr beschränkten Reichweiten der typischerweise kleinen Batterien kaum Sondereinsätze ausserhalb des Fahrplanbetriebs möglich sind. Ähnliches gilt auch für den Kombilader in Bezug auf die spezifischen Gegebenheiten, die für dessen Einsatz gegeben sein müssen. Immerhin ist er aber dank der grösseren Batterie flexibler für den Einsatz ausserhalb des Fahrplanangebots.
- Brennstoffzellen-Busse wie auch Biodiesel- oder Biogasbusse sind in Bezug auf den betrieblichen Einsatz vergleichbar mit dem Dieselbus.

Grafik INFRAS.

Abbildung 15: Einschätzung der Antriebsoptionen aus technischer und betrieblicher Sicht.

	Tauglich für Einsatz im			
	Ortsverkehr		Regionalverkehr	
	technisch	betrieblich	technisch	betrieblich
E-Bus mit Depotladung	✓	✓ abhängig von Reichweite; kurz-/mittelfristig Potenzial noch beschränkt	✓	✓ abhängig von Reichweite; kurz-/mittelfristig Potenzial noch beschränkt
E-Bus mit Gelegenheitsladung statisch entlang Strecke	✓	(✓) Voraussetzung sind genügende Wendezeiten	✓	(✓) Voraussetzung sind genügende Wendezeiten
E-Bus als Kombilader	✓	(✓) Spezif. Situation muss gegeben sein	✓	(✓) Spezif. Situation muss gegeben sein
Batterie-Trolleybus	✓	✓	✗	✗
E-Bus mit Brennstoffzelle konventionell oder als Plug-In	✓	✓	✓	✓
Biodiesel-Bus konventionell oder Plug-In	✓	✓	✓	✓
Biogas-Bus konventionell	✓	✓	✓	✓

Legende: ✓ geeignet, (✓) teilweise geeignet, ✗ nicht geeignet

Grafik INFRAS.

4. Auswirkungsanalyse

4.1. Vorgehen und Kriterien

Die im Kapitel 3.3 definierten zweckmässigen nicht fossilen Antriebsoptionen werden anhand von Fallbeispielen, welche unterschiedliche Einsatzfelder in der Schweiz repräsentieren, vertiefter untersucht. Einerseits werden die Kosten aufgezeigt. Andererseits werden die CO₂-Reduktionspotenziale sowie weitere ökologische Auswirkungen analysiert. Ergänzend werden weitere Kriterien für die verschiedenen Antriebsoptionen (qualitativ) bewertet.

Kostenbetrachtung

Die Quantifizierung der Auswirkungen auf die Kosten erfolgt mittels dynamischer Wirtschaftlichkeitsrechnung nach der Nettobarwert-Methode, welche sämtliche Kostenströme über einen definierten Zeitraum (z. Bsp. eine Fahrzeuggeneration) berücksichtigt, also auch Ersatzbeschaffungen von einzelnen Komponenten wie z. Bsp. Batterien auf den Fahrzeugen. Damit können – verglichen mit einer statischen Kostenrechnung mit Jahreskosten – insbesondere Sensitivitäten in Bezug auf die Entwicklung der Batterien besser abgebildet werden. Die Wirtschaftlichkeitsrechnung berücksichtigt folgende, sich zwischen den Antriebsoptionen massgebend unterscheidende Aspekte:

- Infrastruktur entlang den Linien und in den Depot-/Werkstattanlagen: Investitions- und Wartungs-/Unterhaltskosten,
- Fahrzeuge inkl. Batterie: Beschaffungs- und Unterhaltskosten,
- Energiekosten,
- zusätzliche Fahrpersonalkosten bedingt durch die betrieblichen Auswirkungen der jeweiligen Option (z. Bsp. zusätzliche Fahrzeugumläufe infolge Ladevorgänge).

Um die Auswirkungen des technologischen Fortschritts möglichst transparent herauszuschälen, werden die Kosten der alternativen Antriebsoptionen für verschiedene Umsetzungs-horizonte (2021, 2025, 2030 und 2035) verglichen. Vor allem für den Depotlader-Batteriebus ist – abhängig von der Reichweitenentwicklung – von massgeblichen Betriebskostenreduktionspotenzialen im Verlauf der nächsten 15-20 Jahren auszugehen (vgl. dazu auch Annex A1).

Für die einzelnen Kosten werden einerseits Annahmen gemäss heutigem Preisstand und andererseits zu den künftigen Preisentwicklungen getroffen.

Die Unterschiede zwischen den berücksichtigten Kostenelementen werden jeweils auch in den Kontext Vollkosten gestellt: Wie viel teurer sind die alternativen Antriebsoptionen gegenüber dem konventionellen Dieselsebusbetrieb?¹⁶

Die wichtigsten Annahmen sind im Annex zusammengestellt. Als Ergebnis lassen sich die Mehr-/Minderkosten der nicht fossilen Antriebskonzepte gegenüber der Referenztechnologie (Dieselbus Euro 6) für verschiedene Einsatzfelder und verschiedene Zeithorizonte darstellen.

Weitere wichtige Bemerkungen zur Kostenbetrachtung bzw. Abgrenzung:

- Beim Brennstoffzellen-Bus werden keine Kosten für die Tankanlage berücksichtigt, weil es nicht realistisch ist, dass für eine Linie eine Wasserstofftankanlage erstellt wird.
- Bei den Optionen Biodiesel und Biogas wie auch bei der Referenz Diesel sind die Tankstellenkosten im Treibstoffpreis (anteilmässig) enthalten.
- Beim Gelegenheitslader statisch wird jeweils eine Ladestation entlang der Strecke angenommen. Die Batterie wird entsprechend dimensioniert, so dass der Energiebedarf für einen Umlauf abgedeckt ist. Das Thema Redundanz (Ausfall Ladestation) wird auf Stufe Einzellinie nicht berücksichtigt.
- Bei den Depotlader-Bussen mit grossen, schweren Batterien wird angenommen, dass das Gewicht der Batterie nur einen unwesentlichen Einfluss auf den durchschnittlichen Energieverbrauch hat. Studien zeigen, dass das Gewicht bei Elektrofahrzeugen keine entscheidende Rolle für die Reichweite spielt.¹⁷

Ökologische Auswirkungen

Die Quantifizierung der ökologischen Auswirkungen erfolgt mit einem vereinfachten Ökobilanz- bzw. Lebenszyklusansatz. Neben dem Betrieb der Fahrzeuge wird zur Berechnung von Energiebedarf und Klimawirkung auch die Fahrzeug- und Batterieherstellung inkl. Entsorgung sowie die Energiebereitstellung (z.B. Stromproduktion) berücksichtigt, da die Elektrifizierung von Fahrzeugen einen relevanten Teil der gesamten Umweltbelastung in diese Phasen verschiebt. Für die lokal relevanten Luftschadstoffemissionen wird hingegen nur die Betriebsphase berücksichtigt. Es werden spezifische Resultate (pro Fahrzeug-km) für folgende Indikatoren berechnet und die spezifischen Reduktionspotenziale gegenüber der Referenztechnologie (Dieselbusse Euro 6) quantifiziert:

- Treibhausgas-Emissionen (Cradle to grave)

¹⁶ Hierzu werden folgende Annahmen zum Anteil der berücksichtigten Kostenelemente an den Gesamtkosten einer Linie unterstellt: Gelenkbuslinie 35%, Standard- und Midibuslinie 30%, Kleinbuslinie 25%.

¹⁷ Quelle: <https://www.elektroauto-news.net/2017/gewicht-keine-entscheidende-rolle-reichweite/>

- Primärenergieverbrauch (Cradle to grave)
- Lokale Luftschadstoffe-Emissionen: Feinstaub (inkl. Abrieb und Aufwirbelung von Reifen, Bremsen, Oberleitungen) und Stickoxide (nur Betriebsphase).
- Lärmemissionen (Grobquantifizierung auf Stufe Fahrzeug)

Als wichtigste Grundlagen dienen wissenschaftliche Publikationen (z. B. Althaus et al. 2009¹⁸, Althaus 2012¹⁹, Cox 2018²⁰, Miotti et al 2015²¹), ecoinvent Datenbank Version 3.6, HBEFA 4.1, SonRoad).

Als Ergebnis lassen sich die Reduktionspotenziale von nicht fossilen Antriebskonzepten in den Bereichen Treibhausgasemissionen und Primärenergiebedarf sowie für die Luftschadstoff- und Lärmemissionen gegenüber der Referenztechnologie (Dieselbus Euro 6) abschätzen. Die spezifischen Umweltwirkungen werden analog zu den Kostenbetrachtungen für die verschiedenen Referenzjahre (2021, 2025, 2030 und 2035) verglichen.

Weitere Kriterien

Ergänzend werden qualitativ folgende weiteren Aspekte für die verschiedenen Antriebstechnologien beleuchtet:

- Betriebliche und angebotsplanerische Aspekte:
 - Flexibilität Fahrzeug-Gesamtflotte (z.B. Bahnersatz, Ersatzbetrieb bei Baustellen, Extrafahrten, Shuttle-Angebote bei Anlässen),
 - Interventionen bei Betriebsstörungen (z.B. Verspätungen, Streckenblockierungen),
 - Personaleinsatz/Dienstplanung,
 - Flexibilität für die Angebotsgestaltung und -entwicklung,
 - 24h-Betrieb,
 - Einsatzmöglichkeiten von Doppelgelenkbussen.
- Stadtraum/Ästhetik (z. Bsp. Beeinträchtigungen durch Ladeinfrastrukturen, beispielsweise Trolleybusleitungen oder Ladestationen in denkmalpflegerisch sensiblen Stadträumen bzw. Ortszentren).
- Kundennutzen (z. Bsp. Fahrkomfort).

¹⁸ Althaus H.J., De Haan P. and Scholz R.W. 2009. Traffic noise in LCA Part 2: Analysis of existing methods and proposition of a new framework for consistent, context-sensitive LCI modeling of road transport noise emission. *International Journal of Life Cycle Assessment* 14(7): 676-686.

¹⁹ Althaus H.J. (2012) Vehicle and context specific inclusion of road transport noise impacts in Life Cycle Assessment. Empa Working Paper. DOI: 10.13140/RG.2.2.29925.60643

²⁰ Cox, Brian (2018). *Mobility and the Energy Transition: A Life Cycle Assessment of Swiss Passenger Transport Technologies including Developments until 2050.*, ETH Zurich, Vol. 25081

Cox, B., Mutel, C., Bauer, C., Mendoza Beltran, A. and van Vuuren, D. (2018). The uncertain environmental footprint of current and future battery electric vehicles, *Environmental Science & Technology*, doi:10.1021/acs.est.8b00261

²¹ Miotti, M., Hofer, J., Bauer, C. (2015) Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, doi:10.1007/s11367-015-0986-4

- Anforderungen an die Stromversorgung bzw. Anschlussleistungen in den Busgaragen. Insbesondere die Depotlader mit ihren grossen Batterien stellen bei grösseren Busflotten hohe Anforderungen an die Anschlussleistungen bzw. das Lademanagement in den Depots.
- Umsetzungsaspekte und Planungsverfahren.

4.2. Fallbeispiele

4.2.1. Übersicht

Die Analyse erfolgt anhand von neun Fallbeispielen. Sie unterscheiden sich nach Einsatzfeld (Orts-/Agglomerationslinie sowie Regionallinie Mittelland und Berggebiet) und Busgrösse (Gelenk-, Standard-, Midi- und Kleinbus). Zudem werden zwei verschiedene Taktstrukturen unterschieden, nämlich Linien mit einem ganztägig gleichbleibenden Takt (integrale Taktstruktur) und Linien mit einem Grundtakt und Verdichtungen während der Hauptverkehrszeiten Montag-Freitag (Taktstruktur mit HVZ-Verdichtung). Mit dieser Unterscheidung soll aufgezeigt werden, welchen Einfluss die Taktstruktur auf die Zweckmässigkeit der verschiedenen Ladekonzepte haben kann. Beispielsweise kann auf einer Linie mit HVZ-Verdichtungen der Depotlader auch mit noch beschränkter Reichweite eingesetzt werden, ohne dass zusätzliche Fahrzeuge nötig sind. Denn mit den HVZ-Verstärker-Fahrzeugen können die durchlaufenden Grundkurse abgelöst werden, damit diese nachladen können.

Abbildung 16: Untersuchte Fallbeispiele

Linientyp	Abkürzung	Busgrösse	Abkürzung	Taktstruktur	Abkürzung	Bezeichnung
Orts-/Agglomerationslinie	OV	Gelenkbus	GB	integral	Int	OV_GB_Int
		Standardbus	SB	mit HVZ-Verdichtung	HVZ-V	OV_SB_HVZ-V
Regionallinie Mittelland	RV-M	Gelenkbus	GB	integral	Int	RV-M_GB_Int
				mit HVZ-Verdichtung	HVZ-V	RV-M_GB_HVZ-V
		Standardbus	SB	integral	Int	RV-M_SB_Int
				mit HVZ-Verdichtung	HVZ-V	RV-M_SB_HVZ-V
Midibus	MB	integral	Int	RV-M_MB_Int		
Regionallinie Berggebiet	RV-B	Standardbus	SB	integral	Int	RV-B_SB_Int
		Kleinbus	KB	integral	Int	RV-B_KB_Int

Grafik INFRAS.

Die folgende Abbildung 17 zeigt, welche nicht fossilen Antriebsoptionen für welche Fallbeispiele quantitativ analysiert werden. Die Antriebsoption Batterie-Trolleybus wird nur für nachfragestarke Orts-/Agglomerations-Linien bzw. Linien mit dichtem Angebot untersucht. Aufgrund der erforderlichen Fahrleistungsinvestitionen ist der Batterie-Trolleybus für Regionallinien aus wirtschaftlicher Sicht nicht zweckmässig (weniger dichte Angebote, lange Linien).

Der Kombilader wird nur für ein Fallbeispiel untersucht, weil hierfür sehr spezifische Bedingungen (Zeitfenster mit zu kurzen Wendzeiten zum Nachladen (z. Bsp. während der Hauptverkehrszeiten) und Zeitfenster mit genügend Wendzeiten zum Nachladen (z. Bsp. in den Nebenverkehrszeiten) vorherrschen müssen. Das entsprechende Fallbeispiel (RV_M_GB_HVZ-V) ist so angesetzt.

Für das Fallbeispiel mit Kleinbus wird die Option Gelegenheitslader statisch nicht betrachtet, da sich Kleinbusse für die entsprechende Ladeinfrastruktur auf dem Fahrzeug schlecht eignen.

Plug-In-Hybride (z. Bsp. für Biodiesel, Biogas oder auch Brennstoffzelle) werden nicht explizit als Option durchgerechnet; Aussagen erfolgen über Analogieschlüsse. (Plug-in)Hybride auf Basis von Diesel stellen keine Option dar, weil sie in dieser Kombination nicht fossilfrei sind.

Abbildung 17: Übersicht über die in der Auswirkungsanalyse gerechneten Antriebsoptionen

Antriebsoption	Kurzform	Orts- und Agglolinien		Regionallinie Mittelland					Regionallinie Berggebiet	
		Gelenkbus	Standardbus	Gelenkbus		Standardbus		Midibus	Standardbus	Kleinbus
		OV_GB_Int	OV_SB_HVZ-V	RV-M_GB_Int	RV-M_GB_HVZ-V	RV-M_SB_Int	RV-M_SB_HVZ-V	RV-M_MB_Int	RV-B_SB_Int	RV-B_KB_Int
Batterie-Trolleybus	<i>E-Trolley</i>	X	X	O	O	O	O	O	O	O
E-Bus mit Gelegenheitsladung statisch	<i>E-Gelegen</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	O
E-Bus mit Depotladung	<i>E-Depot</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X
E-Bus als Kombilader	<i>E-Kombi</i>	O	O	O	X	O	O	O	O	O
E-Bus mit Brennstoffzelle	<i>E-BZ</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Biodiesel-Bus	<i>Biodiesel</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Biogas-Bus	<i>Biogas</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Dieselbus Euro 6 (=Referenz)	<i>Diesel = REF</i>	X	X	X	X	X	X	X	X	X

X = wird gerechnet

O = wird nicht gerechnet

Grafik INFRAS

4.2.2. Definition Fallbeispiele Ortsverkehr

Linienkennzahlen

Tabelle 5: Allgemeine Linienkennzahlen zu den Fallbeispielen Ortsverkehr

	OV_GB_Int	OV_SB_HVZ_V
Linien-Cluster	Orts-/Agglomerationslinie	Orts-/Agglomerationslinie
Busgrösse	Gelenkbus	Standardbus
Taktstruktur	Integral	HVZ-Verdichtung
Angebot/Taktintervall Mo-Fr HVZ	10 Min.	7.5 Min.
Mo-Fr NVZ	10 Min.	15 Min.
Sa/So	10/20 Min.	15 Min.
Betriebszeit	06 – 24h	06 – 20h
Linienlänge	12 km	6 km
Fahrzeit (einfach)	35 Min.	18 Min.
Ø Fahrgeschwindigkeit	21 km/h	20 km/h
Umlaufzeit	80 Min.	45 Min.
Aufenthaltszeit Endhaltestelle A	5 Min.	4.5 Min.
Aufenthaltszeit Endhaltestelle B	5 Min.	4.5 Min.
Anz. Fahrzeuge Grundangebot	8 Busse	3 Busse
Anz. Fahrzeuge HVZ-Verdichtung	--	3 Busse
Maximale Wageneinsatzlänge	280 – 350 km/d	300 km/d
Jahres-Kilometerleistung	700'000 km/a	400'000 km/a

Tabelle INFRAS.

Spezifikation Batteriebus-Optionen

Im Folgenden werden für die Batteriebusse (Batterie-Trolley, Gelegenheitslader statisch und Depotlader) spezifiziert, namentlich die Batteriegrössen, die Reichweiten, Ladezeiten und Annahmen zum zusätzlichen Betriebsaufwand als Folge der Ladevorgänge (beim Gelegenheitslader statisch) bzw. der ungenügenden Reichweiten (beim Depotlader).

Bei der Dimensionierung der Batteriegrösse beim Gelegenheitsladern

Tabelle 6: Spezifikation Batteriebusse für Einsatz im Ortsverkehr

	OV_GB_Int	OV_SB_HVZ_V
Linien-Cluster	Orts-/Agglo-Linie	Orts-/Aggo-Linie
Busgrösse	Gelenkbus	Standardbus
Taktstruktur	Integral	HVZ-Verdichtung
Antrieboption Batterie-Trolleybus		
Batteriegrösse	75 kWh	75 kWh
Ladeleistung in Fahrt bei IMC	120 kW	120 kW
Energiezufuhr pro km Oberleitung in Fahrt	6 kWh/km	6 kWh/km
Zielwert Anteil Oberleitung an Linienlänge	60% / 7.2 km	60% / 3.6 km
Streckenanteil mit Oberleitung bestehend	30% / 3.6 km	30% / 1.8 km
Streckenanteil mit Oberleitung neu	30% / 3.6 km	30% / 1.8 km
Antrieboption Gelegenheitslader statisch		
Batteriegrösse (damit nur 1 Ladestation)	100 kWh	75 kWh
Max. Reichweite pro Ladung	25 km	25 km
Energiebedarf einfache Fahrt	24 kWh	9 kWh
Energiebedarf pro Umlauf	48 kWh	18 kWh
Ladezeit Ladestationen beidseitig (450 kW)	4 Min.	2 Min.
Ladezeit Ladestationen einseitig (450 kW)	8 Min.	4 Min.
Anzahl Ladestationen	1	1
Zusätzliche Umläufe	+ 1 Umlauf	keine
Zusätzliche Fahrzeuge	+ 1 Bus	keine
Antrieboption Depotlader		
Batteriegrösse	4 Tonnen*	3.5 Tonnen
Batteriekapazität im Jahr 2021 (100%)	560 kWh	480 kWh
Reichweite pro Ladung im Zeithorizont:		
2021	550 kWh / 130 km	500 kWh / 160 km
2025	800 kWh / 200 km	700 kWh / 240 km
(60% nutzbar)		
2030	1'000 kWh / 260 km	880 kWh / 310 km
2035	1'150 kWh / 310 km	1'000 kWh / 360 km
Zusätzliche Fahrzeuge aufgrund Ladevorgänge im Zeithorizont:		
2021	+ 4 Busse	keine
2025	+ 4 Busse	keine
2030	+ 2 Busse	keine
2035	keine	keine
Distanz Depot – Linieneinsatz (für Kalkulation zus. Leerfahrten)	3 km	3 km

* Ein Depotlader Gelenkbus mit 4 t Batteriemasse hat bei einem zulässigen Gesamtgewicht von 29 t immer noch ca. 8 t Kapazität für Passagiere; bei einem Durchschnittsgewicht pro Passagier von 75 kg entspricht das einer Zuladung von über 100 Passagieren bzw. einer Auslastung von mehr als 4 Pers/m² Stehplätze (= betriebliche Maximalauslastung von Bussen).

Tabelle INFRAS.

4.2.3. Definition Fallbeispiele Regionalverkehr-Mittelland

Linienkennzahlen

Tabelle 7: Allgemeine Linienkennzahlen zu den Fallbeispielen Regionalverkehr Mittelland

	RV_M_GB_Int	RV_M_GB_HVZ_V	RV_M_SB_Int	RV_M_SB_HVZ_V	RV_M_MB_Int
Linien-Cluster	Regionallinie Mittelland	Regionallinie Mittelland	Regionallinie Mittelland	Regionallinie Mittelland	Regionallinie Mittelland
Busgrösse	Gelenkbus	Gelenkbus	Standardbus	Standardbus	Midibus
Taktstruktur	Integral	HVZ-Verdicht.	Integral	HVZ-Verdicht.	Integral
Angebot/Taktintervall Mo-Fr HVZ	15 Min.	15 Min.	30 Min.	30 Min.	30 Min.
Mo-Fr NVZ	15 Min.	30 Min.	30 Min.	60 Min.	30 Min.
Sa/So	15/30 Min.	30 Min.	30 Min.	60 Min.	30 Min.
Betriebszeit	06 – 24h	06 – 24h	06 – 24h	06 – 24h	06 – 20h
Linienlänge	10 km	10 km	18 km	15 km	14 km
Fahrzeit (einfach)	25 Min.	20 Min.	35 Min.	25 Min.	26 Min.
Ø Fahrgeschwindigkeit	24 km/h	30 km/h	31 km/h	36 km/h	32 km/h
Umlaufzeit	60 Min.	45 Min.	90 Min.	60 Min.	60 Min.
Aufenthaltszeit Endhaltestelle A	5 Min.	2.5/10 Min. ²²	10 Min.	5 Min.	4 Min.
Aufenthaltszeit Endhaltestelle B	5 Min.	2.5/10 Min.	10 Min.	5 Min.	4 Min.
Anz. Fahrzeuge Grundangebot	4 Busse	2 Busse	3 Busse	1 Bus	2 Busse
Anz. Fahrzeuge HVZ-Verdichtung	--	1 Bus	--	1 Bus	--
Maximale Wageneinsatzlänge	400 km/d	400 km/d	350 km/d	500 km/d	250 km
Jahres-Kilometerleistung	450'000 km/a	320'000 km/a	400'000 km/a	270'000 km/a	280'000 km/a

Tabelle INFRAS.

Spezifikation Batteriebus-Optionen

Im Folgenden werden für die Batteriebusse (Gelegenheitslader statisch, Depotlader und Kombilader) spezifiziert, namentlich die Batteriegrössen, die Reichweiten, Ladezeiten und Annahmen zum zusätzlichen Betriebsaufwand als Folge der Ladevorgänge (beim Gelegenheitslader statisch) bzw. der ungenügenden Reichweiten (beim Depotlader).

²² In den Hauptverkehrszeiten bestehen beim 15-Minutentakt und dem Einsatz von 3 Bussen nur minimale Wendezeiten von 2-3 Minuten an beiden Linienenden. In den Nebenverkehrszeiten mit Ausdünnung des Fahrplans auf den 30-Minutentakt mit 2 Bussen resultieren grosszügige Wendezeiten von je 10 Minuten an jedem Linienende und somit auch genügend Ladezeit an der Endhaltestelle.

Tabelle 8: Spezifikation Batteriebusse für Einsatz im Regionalverkehr Mittelland: Gelenkbusse

		RV_M_GB_Int	RV_M_GB_HVZ_V
Linien-Cluster		Regionallinie Mittelland	Regionallinie Mittelland
Busgrösse		Gelenkbus	Gelenkbus
Taktstruktur		Integral	HVZ-Verdicht.
Antriebsoption Gelegenheitslader statisch			
Batteriegrösse (damit nur 1 Ladestation)		100 kWh	100 kWh
Max. Reichweite pro Ladung		25 km	25 km
Energiebedarf einfache Fahrt		20 kWh	20 kWh
Energiebedarf pro Umlauf		40 kWh	40 kWh
Ladezeit Ladestationen beidseitig (450 kW)		3 Min.	3 Min.
Ladezeit Ladestationen einseitig (450 kW)		6 Min.	6 Min.
Anzahl Ladestationen		1	1
Zusätzliche Umläufe		+ 1 Umlauf	+ 1 Umlauf
Zusätzliche Fahrzeuge		+ 1 Bus	+ 1 Bus
Antriebsoption Depotlader			
Batteriegrösse		4 Tonnen	4 Tonnen
Batteriekapazität im Jahr 2021 (100%)		560 kWh	560 kWh
Reichweite pro Ladung im Zeithorizont:	2021	130 km	130 km
	2025	200 km	200 km
(60% nutzbar)	2030	260 km	260 km
	2035	310 km	310 km
Zusätzliche Fahrzeuge aufgrund Ladevorgänge im Zeithorizont:	2021	+ 2 Busse	+ 1 Busse
	2025	+ 2 Busse	+ 1 Busse
	2030	+ 1 Busse	+ 1 Busse
	2035	+ 1 Busse	+ 1 Busse
Distanz Depot – Linieneinsatz (für Kalkulation zus. Leerfahrten)		3 km	3 km
Antriebsoption Kombilader			
Batteriegrösse		nicht untersucht	3 Tonnen
Batteriekapazität im Jahr 2021 (100%)		nicht untersucht	420 kWh
Reichweite pro Ladung (60% nutzbar)		nicht untersucht	100 km
Anzahl Ladestationen (auf der Linie)		nicht untersucht	1
Zus. Fahrzeuge aufgrund Ladevorgänge		nicht untersucht	keine

Tabelle INFRAS.

Tabelle 9: Spezifikation Batteriebusse für Einsatz im Regionalverkehr Mittelland: Standard- und Midibusse

		RV_M_SB_Int	RV_M_SB_HVZ_V	RV_M_MB_Int
Linien-Cluster		Regionallinie Mittelland	Regionallinie Mittelland	Regionallinie Mittelland
Busgrösse		Standardbus	Standardbus	Midibus
Taktstruktur		Integral	HVZ-Verdicht.	Integral
Antrieboption Gelegenheitslader statisch				
Batteriegrösse		120 kWh	100 kWh	65 kWh
Max. Reichweite pro Ladung		40 km	32 km	28 km
Energiebedarf einfache Fahrt		27 kWh	22 kWh	15 kWh
Energiebedarf pro Umlauf		54 kWh	44 kWh	30 kWh
Ladezeit Ladestationen beidseitig		4 Min.	3 Min.	3 Min.
Ladezeit Ladestationen einseitig		8 Min.	6 Min.	6 Min.
Anzahl Ladestationen		2	1	1
Zusätzliche Umläufe		keine	+ 1 Umlauf	+ 1 Umlauf
Zusätzliche Fahrzeuge		keine	+ 1 Bus	+ 1 Bus
Antrieboption Depotlader				
Batteriegrösse		3.5 Tonnen	3.5 Tonnen	2.5 Tonnen
Batteriekapazität im Jahr 2021 (100%)		560 kWh	480 kWh	350 kWh
Reichweite pro Ladung im Zeithorizont: (60% nutzbar)	2021	160 km	160 km	150 km
	2025	240 km	240 km	230 km
	2030	310 km	310 km	300 km
	2035	360 km	360 km	350 km
Zusätzliche Fahrzeuge aufgrund Ladevorgänge im Zeithorizont:	2021	+ 2 Busse	+ 1 Busse	+ 1 Busse
	2025	+ 2 Busse	+ 1 Busse	keine
	2030	keine	+ 1 Busse	keine
	2035	keine	+ 1 Busse	keine
Distanz Depot – Linieneinsatz (für Kalkulation zus. Leerfahrten)		3 km	3 km	3 km

Tabelle INFRAS.

4.2.4. Definition Fallbeispiele Regionalverkehr-Berggebiet

Linienkennzahlen

Tabelle 10: Allgemeine Linienkennzahlen zu den Fallbeispielen Regionalverkehr-Berggebiet

	RV_B_SB_Int	RV_B_KB_Int
Linien-Cluster	Berglinie	Berglinie
Busgrösse	Standardbus	Kleinbus
Taktstruktur	Integral	Integral
Angebot/Taktintervall Mo-Fr HVZ	30 Min.	30 Min.
Mo-Fr NVZ	30 Min.	30 Min.
Sa/So	30 Min.	60 Min.
Betriebszeit	06 – 20h	07 – 19h
Linienlänge	25 km	12 km
Fahrzeit (einfach)	55 Min.	27 Min.
Ø Fahrgeschwindigkeit	27 km/h	27 km/h
Umlaufzeit	120 Min.	60 Min.
Aufenthaltszeit Endhaltestelle A	5 Min.	3 Min.
Aufenthaltszeit Endhaltestelle B	5 Min.	3 Min.
Anz. Fahrzeuge Grundangebot	4 Busse	2 Busse
Anz. Fahrzeuge HVZ-Verdichtung	--	
Maximale Wageneinsatzlänge	300 km/d	300 km/d
Jahres-Kilometerleistung	500'000 km/a	200'000 km/a

Tabelle INFRAS.

Spezifikation Batteriebus-Optionen

Im Folgenden werden für die Batteriebusse (Gelegenheitslader statisch und Depotlader) spezifiziert, namentlich die Batteriegrössen, die Reichweiten, Ladezeiten und Annahmen zum zusätzlichen Betriebsaufwand als Folge der Ladevorgänge (beim Gelegenheitslader statisch) bzw. der ungenügenden Reichweiten (beim Depotlader).

Der spezifische Energiebedarf pro km bzw. die Reichweiten für den Depotlader auf den Berglinien wurden mit denselben Annahmen unterstellt wie für die Mittellandlinien. **Es wird somit eine Zusatzheizung mit Biotreibstoff für die Abdeckung der kalten Winterperioden unterstellt.**

Tabelle 11: Spezifikation Batteriebusse für Einsatz im Regionalverkehr-Berggebiet

		RV_B_SB_Int	RV_B_KB_Int
	Linien-Cluster	Orts-/Agglo-Linie	Orts-/Aggo-Linie
	Busgrösse	Gelenkbus	Standardbus
	Taktstruktur	Integral	HVZ-Verdichtung
Antrieboption Gelegenheitslader statisch			
Batteriegrösse		200 kWh	
Max. Reichweite pro Ladung		65 km	
Energiebedarf einfache Fahrt		37 kWh	keine Option
Energiebedarf pro Umlauf		74 kWh	
Ladezeit Ladestationen beidseitig		5 Min.	
Ladezeit Ladestationen einseitig		10 Min.	
Anzahl Ladestationen		1	
Zusätzliche Umläufe		+ 1 Umlauf	
Zusätzliche Fahrzeuge		+ 1 Bus	
Antrieboption Depotlader			
Batteriegrösse		3.5 Tonnen	1.5 Tonnen
Batteriekapazität im Jahr 2021 (100%)		480 kWh	210 kWh
Reichweite pro Ladung im Zeithorizont: (60% nutzbar)	2021	160 km	130 km
	2025	240 km	190 km
	2030	310 km	250 km
	2035	360 km	290 km
Zusätzliche Fahrzeuge aufgrund Ladevorgänge im Zeithorizont:	2021	+ 2 Busse	+ 1 Bus
	2025	+ 2 Busse	+ 1 Bus
	2030	keine	+ 1 Bus
	2035	keine	keine
Distanz Depot – Linieneinsatz (für Kalkulation zus. Leerfahrten)		3 km	3 km

Tabelle INFRAS.

4.3. Kosten

Vorbemerkung zu den Kosten: Im Detail analysiert werden diejenigen Kostenblöcke, die sich massgebend zwischen den untersuchten Optionen unterscheiden (Fahrzeuginvestitionen, Fahrzeugunterhalt, Energiekosten, Investitionen und Unterhalt Ladeinfrastrukturen und evtl. zusätzliche Fahrpersonalkosten aufgrund von Ladevorgängen). Die daraus eruierten absoluten Mehrkosten werden in den Kontext der Vollkosten (inkl. Fahrpersonal, Verwaltungskosten und weitere Gemeinkosten) eines Busses bzw. einer Linie gestellt. Die Aussagen zu den daraus resultierenden relativen Mehrkosten beziehen sich somit immer auf die Vollkosten.

4.3.1. Ergebnisse Ortsverkehr

Wichtigste Erkenntnisse

Abbildung 18 zeigt die Mehrkosten der verschiedenen fossilfreien Antriebsoptionen im Vergleich zur Referenztechnologie Dieselbus Euro 6 (bezogen auf die Vollkosten). Details zu den absoluten Mehrkosten differenziert nach den einzelnen Kostenblöcken sowie die Annahmen dazu finden sich im Annex.

Zu den Kostenauswirkungen lässt sich folgendes festhalten:

- Kurzfristig sind zwar die Batteriebusse mit Gelegenheitsladung statisch und Depotladung im Vergleich zum Dieselbus teurer. Längerfristig holen jedoch die Batteriebusse stark auf. Bei günstigen Einsatzbedingungen (keine zusätzlichen Fahrzeuge bzw. Fahrpersonalkosten) werden im Horizont 2030/2035 die Mehrkosten gegenüber Dieselnissen bei den unterstellten Energiepreisen (Diesel 1CHF/l, Strom 0.15 CHF/kWh) nicht mehr als 10% ausmachen.
- Das Ergebnis des Batterietrolleybusses hängt stark vom Anteil neu zu erstellender Oberleitung ab. In den der Abbildung 18 unterstellten Berechnungen wird davon ausgegangen, dass für einen zuverlässigen Betrieb 60% der Linienlänge mit einer Oberleitung ausgerüstet sein muss und dass davon bereits die Hälfte vorhanden und mitgenutzt werden kann. Das heisst, dass der neu zu elektrifizierende Streckenanteil ca. 30% der gesamten Linie ausmacht. Müssen lediglich 15% der gesamten Linienlänge neu elektrifiziert werden, liegen die Mehrkosten des Batterietrolleybusses in ähnlicher Grössenordnung wie beim Gelegenheitslader statisch oder dem Depotlader, nämlich bei idealen Einsatzbedingungen kurzfristig bei ca. 15%, längerfristig bei ca. 10%.

- Der Gelegenheitslader statisch ist dann interessant, wenn er nur eine Ladestation auf der Linie benötigt und die Wendezeiten am Linienende zum Nachladen ausreichen, ohne die Fahrplanstabilität zu gefährden. Unter diesen Bedingungen (Beispiel rechts in Abbildung 18) führt er bereits kurzfristig zu Mehrkosten von 10-15% gegenüber dem Dieselbus.
- Erfordert der Fahrplan beim Gelegenheitslader statisch einen zusätzlichen Fahrzeugumlauf, damit genügend Ladezeiten am Linienende bestehen (Beispiel links in Abbildung 18), bleibt diese Option (bei unverändertem Fahrplan) auch längerfristig teuer mit Mehrkosten in der Grössenordnung von 20% gegenüber dem Dieselbus; die positiven Kostenentwicklungen der Batteriebusse werden durch die betrieblich bedingten Mehrkosten teilweise wieder kompensiert. Dies im Gegensatz zum Depotlader. Aufgrund noch ungenügender Reichweiten ist diese Option kurzfristig auch vergleichsweise teurer (je nach Anzahl zusätzlicher Fahrzeuge zwischen +20 bis 30%). Der Depotlader bzw. dessen Reichweiten profitieren jedoch stark von der Batterieentwicklung, so dass die Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus längerfristig unter +10% sinken, wenn die heutigen Tageseinsätze ohne Nachladen abzudecken und kein Fahrzeugtausch nötig sind (Beispiel links in Abbildung 18). Die Reichweiten werden von heute rund 150 km auf 300 – 350 km pro Ladung im Horizont 2030/2035 ansteigen.
- Der Depotlader ist jedoch auch für Einsätze auf Linien mit Verdichtungsangeboten während der Hauptverkehrszeiten interessant. Denn mit den HVZ-Verstärker-Fahrzeugen können die durchlaufenden Grundkurse abgelöst werden, damit diese nachladen können. Kurzfristig führt diese Option allerdings aufgrund der grossen, teureren Batterien verglichen mit einem Gelegenheitslader auch zu vergleichsweise hohen Mehrkosten von rund 20% (Beispiel rechts in Abbildung 18). Längerfristig reduzieren sich jedoch diese Mehrkosten aufgrund der Batterieentwicklungen, so dass diese Option günstiger wird verglichen mit einem Gelegenheitslader statisch mit zusätzlichem Fahrzeugumlauf.
- Der Brennstoffzellenbus stellt die teuerste Option dar, selbst wenn die H2-Tankinfrastruktur, wie in den Ergebnissen gemäss Abbildung 18 unterstellt, nicht angerechnet wird. Die Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus liegen kurzfristig bei ca. 40%, längerfristig sinkt die Differenz auf ca. 30%.
- Sofern die spezifischen Rahmenbedingungen einer Linie gegeben sind, kann auch der Kombilader (Depotlader mit Nachlademöglichkeit auf der Strecke) für den Ortsverkehr kostenseitig interessant sein (vgl. dazu Ausführungen zu den Regionallinien im Kapitel 4.3.2).
- Kurzfristig am günstigsten bzw. deutlich günstiger als die i.d.R. noch teuren Batteriebusse wären die Optionen mit Biotreibstoffen (Biodiesel oder Biogas²³) mit rund 10% Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus. Längerfristig verlieren sie jedoch diesen Kostenvorteil gegenüber den Batteriebussen, welche im Horizont 2030/2035 bei optimalen Einsatzbedingungen das

²³ Unterstellten Energiepreisen: Biodiesel 2 CHF/l, Biogas 2.20 CHF/kg

Potenzial haben, sogar günstiger als mit Biotreibstoffen betriebene Busse zu sein. Zudem stellt sich für die Biotreibstoffe grundsätzlich die Frage der Verfügbarkeit (vgl. dazu auch Ausführungen im Annex A3).

Fazit

Aus Kostensicht ist zu unterscheiden nach der kurzfristigen Situation und den absehbaren Entwicklungen. Kurzfristig sind die Batteriebusse vergleichsweise teuer und die Einsatzpotenziale für zweckmässige Einsätze beschränkt (v.a. für den Depotlader mit noch ungenügenden Reichweiten pro Ladung). Längerfristig haben die Batteriebusse jedoch das Potenzial, je nach Einsatzbedingungen und Annahmen zu den Batterie-Lebensdauer, die kostengünstigsten Optionen zu sein. Positiv zugunsten der Batteriebusse würde sich auch die Aufhebung der Mineralölsteuer-Rückerstattung auswirken, die heute die Dieselbusse begünstigt.

Kurzfristig stellen die Biotreibstoffe tendenziell die günstigsten Optionen dar. Hierzu stellt sich jedoch die Frage, ob in einer Übergangsphase, bis die Vorteile der Batterie-Busse voll zum Tragen kommen, auf diese Optionen umgeschwenkt werden soll. Denn hierfür wären Biodiesel- und Biogastankstellen zu errichten sowie Werkstattanpassung und Personalumschulungen für eine Übergangstechnologie erforderlich. Gegen Biotreibstoffe spricht auch die beschränkte Verfügbarkeit insbesondere für in der Schweiz hergestellte Biotreibstoffe. CH-Biodiesel aus gebrauchtem Speiseöl (Used Cooking-Oil) dürfte beispielsweise nicht für alle ÖV-Busse der Schweiz ausreichen und könnte somit höchstens auf einzelnen Linien eine Option darstellen. Zudem stellt sich auch die Frage, ob aus einer über den öffentlichen Verkehr hinausgehender Gesamtsicht eine Verwendung von Biotreibstoffen in Bereichen im Vordergrund stehen soll, wo andere Alternativen für eine Reduktion der Treibhausgasemissionen zurzeit noch fehlen, zum Beispiel im Langstrecken-Strassengüterverkehr, in der Hochseeschiffe oder im Flugverkehr.

Abbildung 18: Mehrkosten im Orts-/Agglomerationsverkehr ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung)

Grundannahmen (mit Mineralölsteuer-Rückerstattung für KTU)

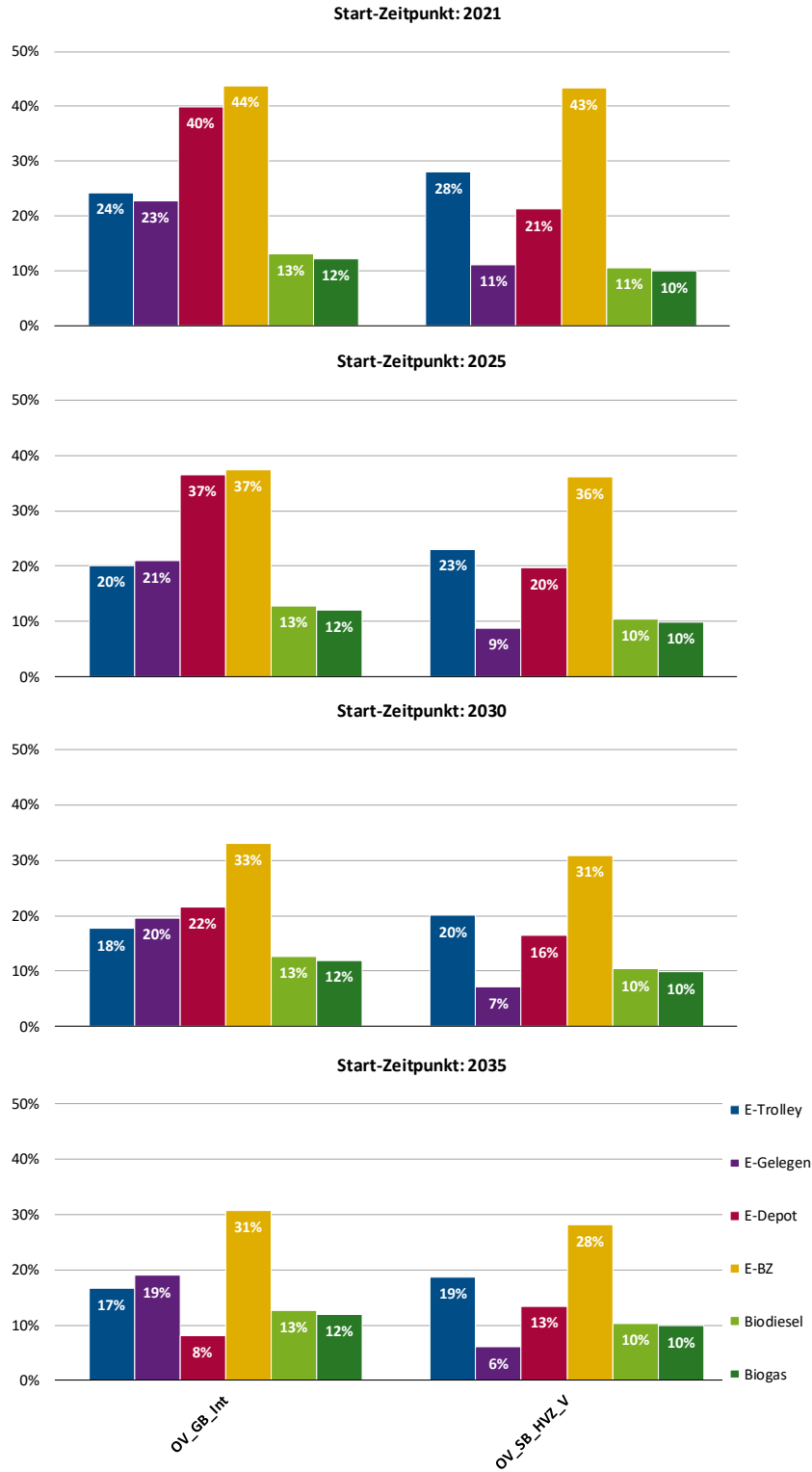


Tabelle INFRAS.

Sensitivitäten

- **Aufhebung Mineralölsteuer-Rückerstattung:** Entfällt die MinöSt.-Rückerstattung für KTU (0.59 CHF/l Diesel), verteuert sich die Referenzvariante Dieselbus und entsprechend sinken die Mehrkosten der fossilfreien Antriebsoptionen. Wie die Abbildung 19 zeigt, verringern sich die Mehrkosten der Batteriebusse um 5 bis 10 Prozentpunkte. Bei den Biotreibstoffen verringern sich die Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus um ca. 5 Prozentpunkte.
- **Längere Batterielebensdauer von 12 statt 6 Jahren:** Damit werden vor allem die Depotlader mit grossen und entsprechend teuren Batterien günstiger. Kurz-/mittelfristig verringern sich die Mehrkosten um knapp 10 Prozentpunkte, längerfristig im Zeithorizont 2030/2035 um ca. 5 Prozentpunkte gegenüber dem Dieselbus (vgl. Abbildung 20). Für die Gelegenheitslader mit den kleineren, günstigeren Batterien ist der Effekt deutlich kleiner. Die Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus verringern sich lediglich um 1-2%. Und bei der Brennstoffzelle, bei welcher bei dieser Sensitivität unterstellt ist, dass auch die Brennstoffzelle selber eine Lebensdauer von 12 Jahren hat, verringern sich die Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus um ca. 5-6%. Würde man zusätzlich noch von einer Aufhebung der Mineralölsteuer-Rückerstattung ausgehen, werden die Batteriebusse langfristig sogar günstiger als der Dieselbus. Gemäss Ausführungen zur Lebensdauer von Batterien im Annex A1.1 (ab Seite 196) ist eine Lebensdauer von 12 Jahren für grossen Depotlader-Batterien, die einmal täglich geladen werden, durchaus realistisch. Für die Gelegenheitslader, deren Batterien täglich mehrmals geladen werden, scheinen hingegen 12 Jahre als unrealistisch. Wie oben ausgeführt, sind aber die Annahme bzgl. Batterielebensdauer bei den Gelegenheitsladern auch nicht so sensitiv wie beim Depotlader.
- **Längere Lebensdauer der Elektrobusse von 20 Jahren statt 12 Jahre wie beim Dieselbus;** bei den Batterien wird angenommen, dass diese über die Lebensdauer einmal ersetzt wird (nach 10 Jahren): Die Mehrkosten gegenüber dem Diesel verringern sich noch stärker als bei der Sensitivität «12 Jahre Fahrzeuge/12 Jahre Batterie», nämlich beim Depotlader um 10-15% und bei den Gelegenheitsladern um 5-6% (vgl. Abbildung 21. Die Kosten der Depotlader und der Gelegenheitslader nähern sich bei günstigen Einsatzbedingungen (keine zusätzlichen Busse) längerfristig den Dieselmotorkosten an. Bei einer Aufhebung der MinöSt.-Rückerstattung würden die Batteriebusse langfristig sogar günstiger als Dieselbusse. Bei dieser Sensitivität ist jedoch zu beachten, dass keine höheren Unterhaltskosten mit zunehmendem Alter der Fahrzeuge sowie auch keinerlei Refit-Massnahmen im Innern der Fahrzeuge zur Aufrechterhaltung des Fahrgastkomforts unterstellt sind. Beide Aspekte werden jedoch bei einer Lebensdauer von 20 Jahren relevant. Die Auswirkungen dieser Sensitivität werden entsprechend überschätzt.

Abbildung 19: Mehrkosten im Orts-/Agglomerationsverkehr ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung)

Sensitivität: keine Mineralölsteuer-Rückerstattung für KTU / Lebensdauer alle Fahrzeuge 12 J. und Batterie 6 J.

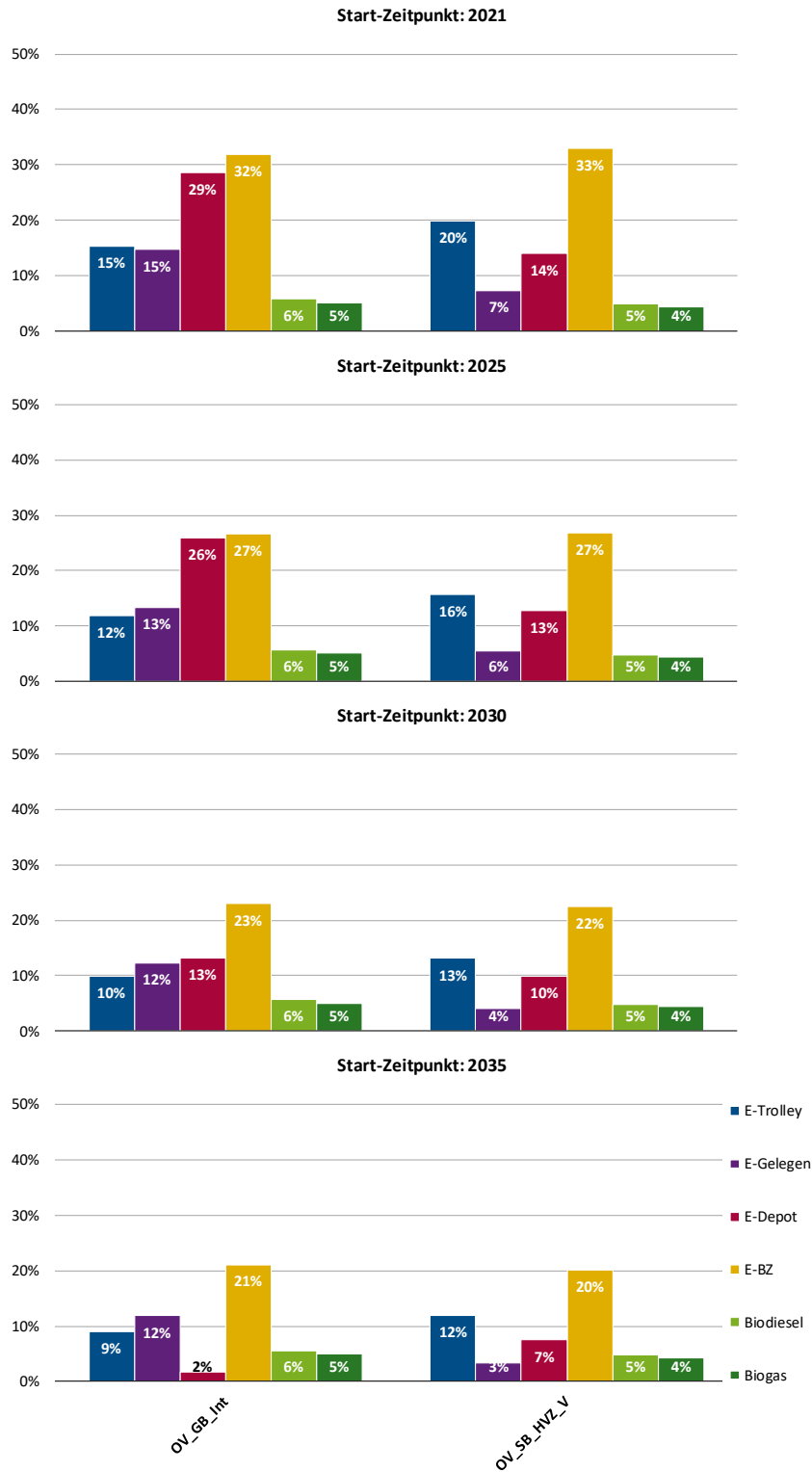


Tabelle INFRAS.

Abbildung 20: Mehrkosten im Orts-/Agglomerationsverkehr ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung)

Sensitivität: mit Mineralölsteuer-Rückerstattung für KTU / Lebensdauer alle Fahrzeuge 12 J. und Batterie 12 J.

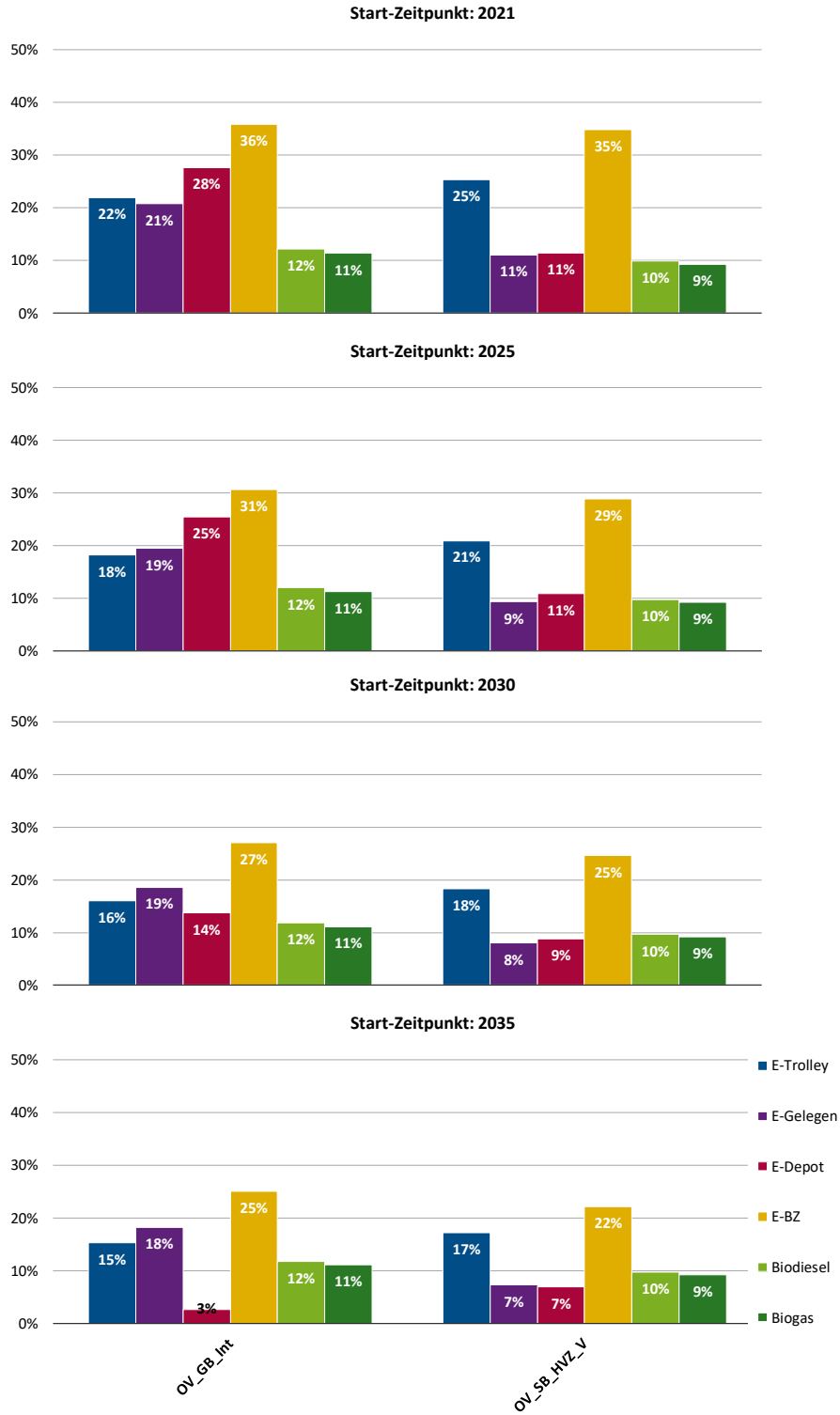


Tabelle INFRAS.

Abbildung 21: Mehrkosten im Orts-/Agglomerationsverkehr ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung)

Sensitivität: mit Mineralölsteuer-Rückerstattung für KTU / Lebensdauer E- Fahrzeuge 20 J. und Batterie 10 J.

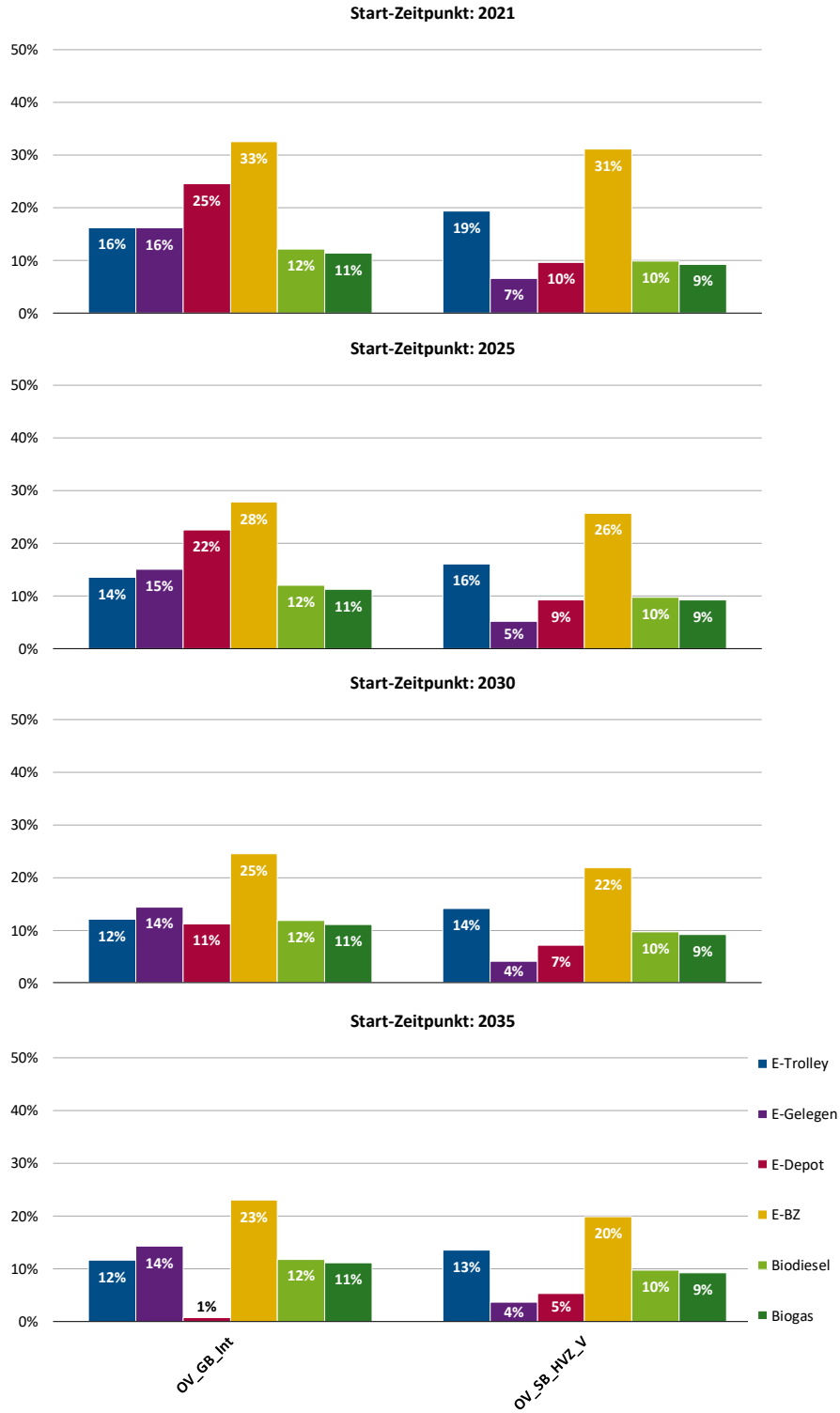


Tabelle INFRAS.

4.3.2. Ergebnisse zum Regionalverkehr-Mittelland

Wichtigste Erkenntnisse

Abbildung 22 zeigt die Mehrkosten der verschiedenen fossilfreien Antriebsoptionen im Vergleich zur Referenztechnologie Dieselbus Euro 6. Details zu den Mehrkosten differenziert nach den einzelnen Kostenblöcken sowie die Annahmen dazu finden sich im Annex.

Zu den Kostenauswirkungen bei den Regionallinien-Mittelland lässt sich folgendes festhalten:

- Grundsätzlich gelten für die Regionallinien ähnliche Aussagen zu den kurz- und langfristigen Auswirkungen bezüglich Mehrkosten gegenüber dem Dieselantrieb (vgl. Kapitel 4.3.1).
- Sofern die spezifischen Rahmenbedingungen einer Linie gegeben sind, stellt auch der Kombilader (Depotlader mit Nachlademöglichkeit auf der Strecke) bereits kurzfristig eine kostenmässig günstige Option dar mit Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus von 10-15% (2. Fallbeispiel von links in Abbildung 22). Der Kombilader eignet sich primär auf Linien, welche während der Hauptverkehrszeiten zu kurzen Wendezeiten für ein Nachladen aufweisen, während in den Nebenverkehrszeiten bei ausgedünntem Fahrplan genügend Zeit an den Linienenden zum Nachladen besteht.²⁴
- Wie beim Ortsverkehr ist der Gelegenheitslader statisch dann interessant, wenn er nur eine Ladestation auf der Linie benötigt (und allenfalls durch mehrere Linien benutzt werden kann) und die Wendezeiten am Linienende zum Nachladen ausreichen, ohne die Fahrplanstabilität zu gefährden. Unter diesen Bedingungen (3. Fallbeispiel von links in Abbildung 22) führt er bereits kurzfristig zu Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus von nur +10-15%.
- Hohe Mehrkosten löst der Gelegenheitslader statisch aus, wenn aufgrund ungenügender Ladeweiten im Fahrplan ein zusätzlicher Fahrzeugumlauf nötig ist. Besonders hoch mit bis zu +70% sind diese bei Linien mit geringem Angebot und wenigen Fahrzeugen (Fallbeispiele rechts in Abbildung 22). Aber auch bei einem 15-Minutentakt sind die Mehrkosten bei einem zusätzlichen Umlauf mit +30% vergleichsweise hoch.
Generell haben bei den Regionallinien die Ladestationen auf der Linie einen stärkeren Anteil an den Kosten verglichen mit den dichter verkehrenden Ortslinien.
- Ähnlich wie im Ortsverkehr ist der Depotlader aufgrund der noch ungenügenden Reichweiten kurzfristig eine teure Option, weil er den Fahrzeugbedarf erhöht. Langfristig hat er jedoch das Potenzial für die günstigste fossilfreie Antriebsart mit Mehrkosten in der Grössenordnung von noch +5%, sofern die heutigen Tagesleistungen ohne Nachladen abgedeckt werden können. Dies ist der Fall für Linien mit Tageseinsätzen < 400 km (3. und 5. Fallbeispiel von links in Abbildung 22).

²⁴ Diese Rahmenbedingungen sind beispielsweise beim laufenden Pilotversuch der Linie 17 in Bern gegeben.

- Der Brennstoffzellenbus stellt auch bei den Regionallinien die teuerste Option dar, selbst wenn die H₂-Tankinfrastruktur, wie in den Ergebnissen gemäss Abbildung 22 unterstellt, nicht angerechnet wird. Die Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus liegen kurzfristig bei ca. 40% für die Gelenk- und Standardbuslinien und bei ca. 30% für Midibuslinien; längerfristig sinkt die Differenz auf ca. 30% bzw. 20%. Je nach lokalen Voraussetzungen kann aber der Brennstoffzellenbus durchaus eine Option darstellen, beispielsweise wenn sehr hohe Tagesleitungen gefordert sind.
- Kurzfristig am günstigsten bzw. deutlich günstiger als die i.d.R. noch teuren Batteriebusse wären die Optionen mit Biotreibstoffen (Biodiesel oder Biogas²⁵) mit rund 10% Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus. Längerfristig verlieren sie jedoch diesen Kostenvorteil gegenüber den Batteriebussen, welche im Horizont 2030/2035 bei optimalen Einsatzbedingungen das Potenzial haben, sogar günstiger als mit Biotreibstoffen betriebene Busse zu sein. Zudem stellt sich für die Biotreibstoffe grundsätzlich die Frage der Verfügbarkeit (vgl. dazu auch Ausführungen im Annex A3).

Fazit

Aus Kostensicht ist zu unterscheiden nach der kurzfristigen Situation und den absehbaren Entwicklungen. Kurzfristig sind auch im Regionalverkehr die Batteriebusse vergleichsweise teuer und die Einsatzpotenziale für zweckmässige Einsätze beschränkt (v.a. für den Depotlader mit noch ungenügenden Reichweiten pro Ladung). Analog zum Ortsverkehr haben die Batteriebusse längerfristig jedoch das Potenzial, je nach Einsatzbedingungen und Annahmen zu den Batterie-Lebensdauer, die kostengünstigsten Optionen zu sein. Positiv zugunsten der Batteriebusse würde sich auch die Aufhebung der Mineralölsteuer-Rückerstattung auswirken, die heute die Dieselbusse begünstigt.

Kurzfristig stellen die Biotreibstoffe auch im Regionalverkehr tendenziell die günstigsten Optionen dar. Zur Zweckmässigkeit bzw. Verfügbarkeit der Biotreibstoffe im ÖV gelten dieselben Ausführungen wie beim Ortsverkehr.

Sensitivitäten

Zu den Sensitivitäten «keine MinöSt-Rückerstattung», «Lebensdauer alle Busse 12 J. und Batterien 12 J.» sowie «Lebensdauer E-Busse 20 J. und Batterien 12 J.» gelten die gleichen Aussagen wie beim Ortsverkehr im Kapitel 4.3.1 ausgeführt.

²⁵ Unterstellten Energiepreisen: Biodiesel 2 CHF/l, Biogas 2.20 CHF/kg

Abbildung 22: Mehrkosten im Regionalverkehr-Mittelland ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung)

Grundannahmen (mit Mineralölsteuer-Rückerstattung für KTU)

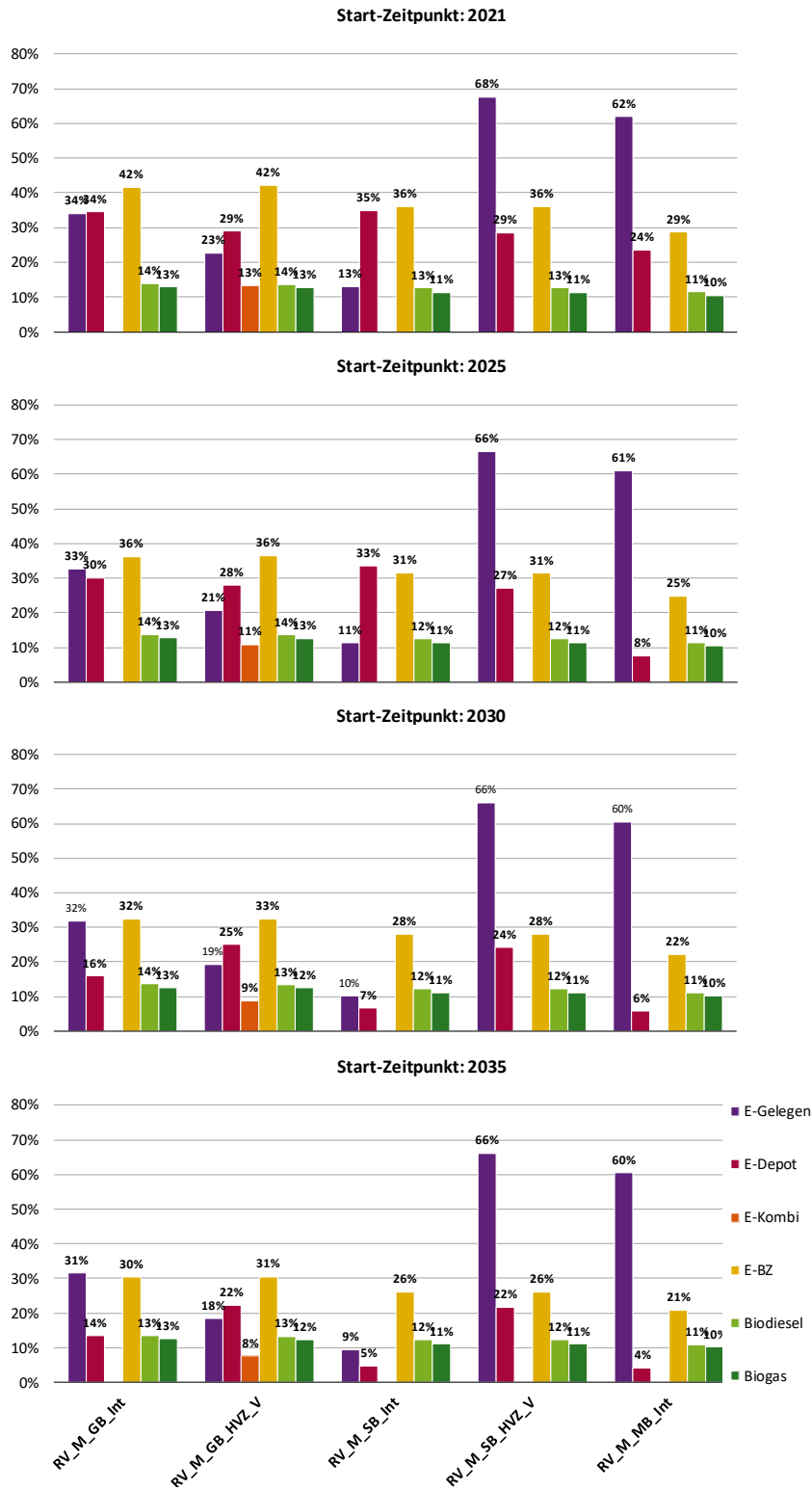


Tabelle INFRAS.

Abbildung 23: Mehrkosten im Regionalverkehr-Mittelland ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung)

Sensitivität: keine Mineralölsteuer-Rückerstattung für KTU



Tabelle INFRAS.

4.3.3. Ergebnisse zum Regionalverkehr-Berggebiet

Wichtigste Erkenntnisse

Abbildung 24 zeigt die Mehrkosten der verschiedenen fossilfreien Antriebsoptionen im Vergleich zur Referenztechnologie Dieselbus Euro 6. Details zu den Mehrkosten differenziert nach den einzelnen Kostenblöcken sowie die Annahmen dazu finden sich im Annex.

Zu den Kostenauswirkungen bei den Regionallinien-Berggebiet lässt sich folgendes festhalten:

- Wie beim Ortsverkehr und den Regionallinien im Mittelland ist der Gelegenheitslader statisch nur dann interessant, wenn die Wendezeiten am Linienende zum Nachladen ausreichen, ohne die Fahrplanstabilität zu gefährden. Im untersuchten Fallbeispiel für eine Linie mit Standardbussen (Abbildung 24, links) ist dies nicht der Fall, die Wendezeiten sind zu knapp, so dass der Gelegenheitslader statisch einen zusätzlichen Umlauf benötigt, mit Mehrkosten gegenüber dem Dieselbus von rund 35%.
- Ähnlich wie im Ortsverkehr ist der Depotlader aufgrund der noch ungenügenden Reichweiten kurzfristig eine teure Option, weil er den Fahrzeugbedarf erhöht. Langfristig hat er jedoch das Potenzial für die günstigste fossilfreie Antriebsart mit Mehrkosten in der Grössenordnung von noch +5% bei Standardbuslinien bzw. +10% bei Kleinbussen, sofern die heutigen Tagesleistungen ohne Nachladen abgedeckt werden können. Dies ist der Fall für die beiden untersuchten Fallbeispiel-Linien mit max. Tageseinsätzen von rund 300 km.
- Der Brennstoffzellenbus ist für die Berglinien kurzfristig ähnlich teuer wie die Batteriebusse. Längerfristig wird er günstiger als der Gelegenheitslader statisch, wenn dieser einen zusätzlichen Busumlauf zum Nachladen nötig macht. Der Brennstoffzellenbus ist jedoch deutlich teurer als der Depotlader, wenn dessen Reichweiten genügend gross sind, so dass kein Fahrzeugtausch notwendig ist. Je nach lokalen Voraussetzungen kann aber der Brennstoffzellenbus durchaus eine Option darstellen, beispielsweise wenn sehr hohe Tagesleistungen gefordert sind.
- Zu den Optionen mit Biotreibstoffen gelten dieselben Ausführungen wie zu den Regionallinien im Mittelland (vgl. Kapitel 4.3.2).

Fazit

Hierzu gelten dieselben Ausführungen wie zu den Orts- und Regionallinien im Mittelland.

Sensitivitäten

Zu den Sensitivitäten «keine MinöSt-Rückerstattung», «Lebensdauer alle Busse 12 J. und Batterien 12 J.» sowie «Lebensdauer E-Busse 20 J. und Batterien 12 J.» gelten die gleichen Aussagen wie beim Ortsverkehr im Kapitel 4.3.1 ausgeführt.

Abbildung 24: Mehrkosten im Regionalverkehr-Berggebiet ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung)

Grundannahmen (mit Mineralölsteuer-Rückerstattung für KTU)

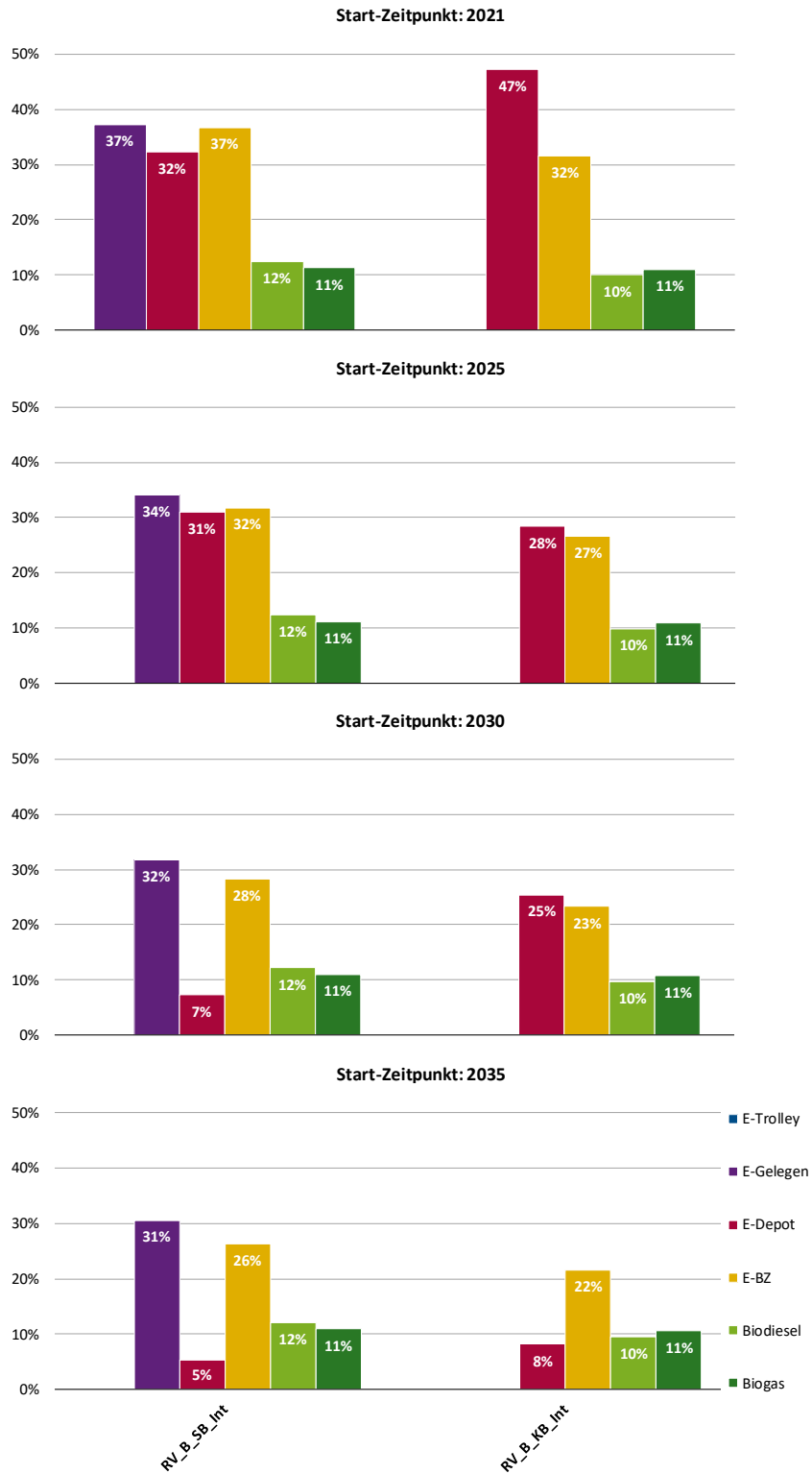


Tabelle INFRAS.

Abbildung 25: Mehrkosten im Regionalverkehr-Berggebiet ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung)

Sensitivität: keine Mineralölsteuer-Rückerstattung für KTU

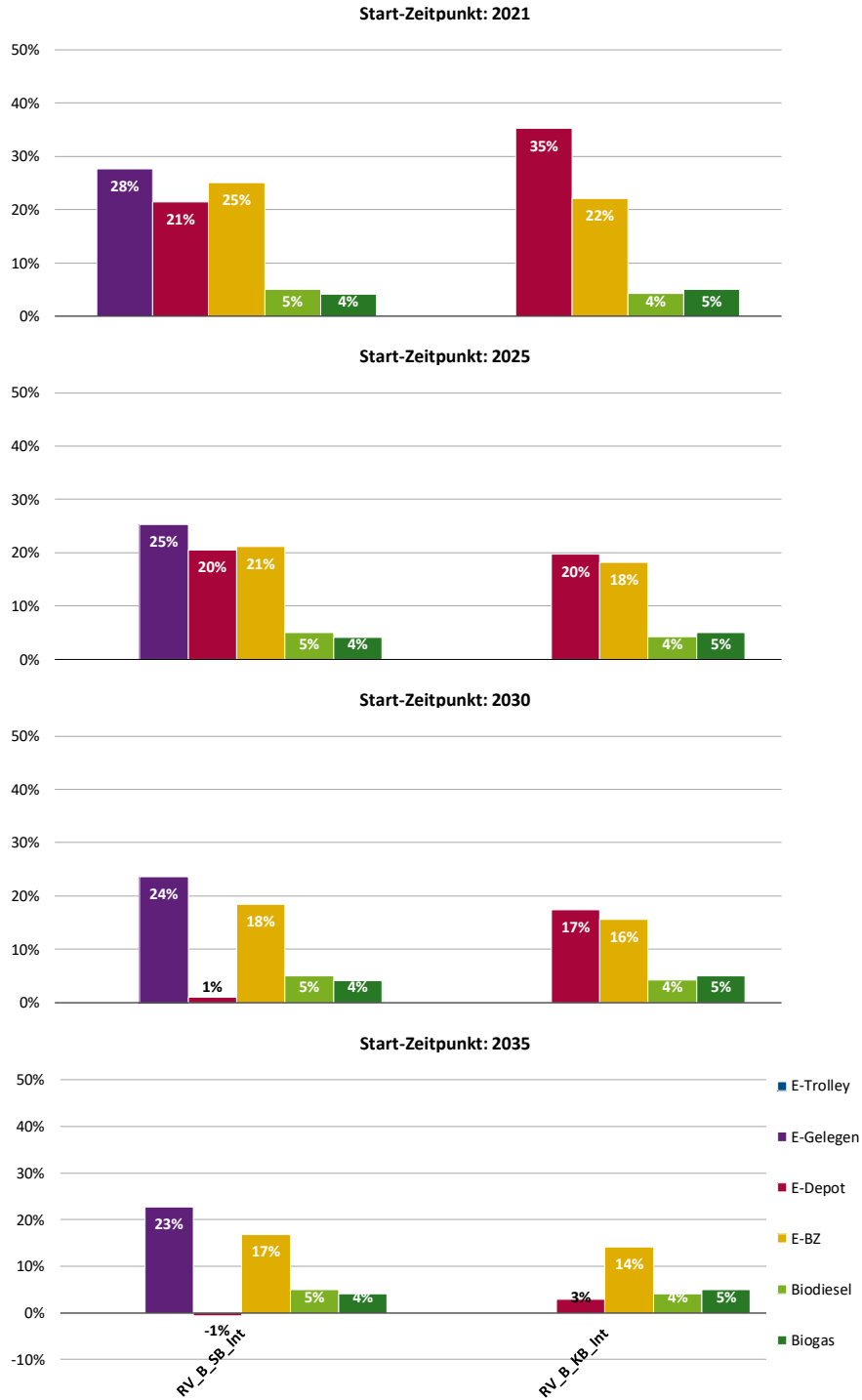


Tabelle INFRAS.

4.3.4. Hybridbusse

Kosten zu (Plug-In-)Hybridbussen sind in den Fallstudien nicht ausgewiesen, weil sie stark von der spezifischen Ausprägung des Busses abhängig sind. Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, diskutieren wir hier Biodiesel-Hybride und -Plug-in-Hybride sowie Biogashybride.

Konventionelle Hybride, also solche ohne die Möglichkeit, die Batterie am Stromnetz zu laden, weisen etwas höhere Anschaffungskosten (5–10%) auf als nicht hybridisierte Busse. Auch die Wartungskosten sind höher. Dafür ist der Treibstoffbedarf i.d.R. etwa 10–20% tiefer gegenüber konventionellen Dieselmotoren. Bei konventionellen Biodieselmotoren machen Anschaffung und Wartung zusammen etwa 45% und die Energie etwa 55% der Fahrzeugkosten aus. Somit ergeben sich über alles sowohl bei den Biodiesel- als auch bei den Biogashybridbussen tendenziell etwas tiefere Gesamtkosten als bei den entsprechenden, nicht hybridisierten Bussen.

In der Anschaffung liegen Plug-in-Hybride typischerweise zwischen Dieselmotoren- und Depotladerbussen. Sie sind also sicher teurer als Dieselmotoren. Je grösser die Batterie, desto näher kommen sie preislich zu den Depotladern. Wäre die Batterie eines Plug-in-Hybrids so gross wie die eines vergleichbaren Depotladers, wäre dieser Bus auch teurer als der Depotlader. Im Unterhalt ist ein Plug-in-Hybrid vergleichbar mit einem konventionellen Hybrid. Die Energiekosten sind abhängig von der Batteriegrösse und vom Einsatz. Je grösser die Batterie und damit der Anteil der Tagesstrecke, die mit Netzstrom gefahren werden kann, desto günstiger ist die benötigte Energie. Es gilt also generell, dass Fahrzeuge, die in der Anschaffung teurer sind, dafür geringere Energiekosten verursachen. Über alles liegen auch die Kosten von Plug-in-Hybriden zwischen denen von Hybriden und denen von Depotladern. Da die Energiekosten pro km von Depotladern über dreimal tiefer liegen als die von Biodieselmotoren, die Anschaffungs- und Wartungskosten aber nur etwa 25% höher sind, würde das Kostenoptimum bei Plug-in-Hybriden mit relativ grossen Batterien liegen.

Abschliessend muss aber wiederholt werden, was in Kapitel 3.2.4 bereits gesagt wurde: Plug-in-Hybride entwickeln ihre Stärke in Anwendungen, in denen oftmals die Batteriekapazität ausreicht und der Verbrennungsmotor nicht benötigt wird, die aber auch regelmässig grössere Tagesfahrleistungen erfordern. Entsprechend dürften Plug-in-Hybride nur in wenigen Fällen die ökonomisch optimale Lösung darstellen.

4.4. Ökologie

Vorbemerkung zu den ökologischen Auswirkungen der Elektrobusse: Erklärtes Ziel für diese Antriebsoption ist die Verwendung von Strom aus 100% erneuerbarer Quellen. Deshalb wird auf Sensitivitätsbetrachtungen zum Strommix verzichtet.

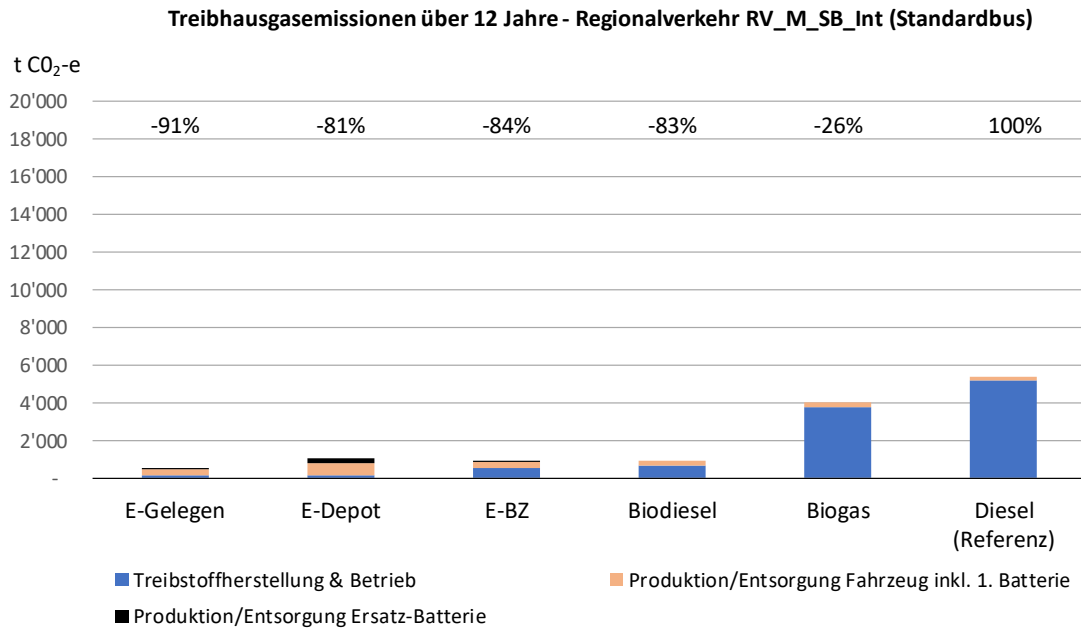
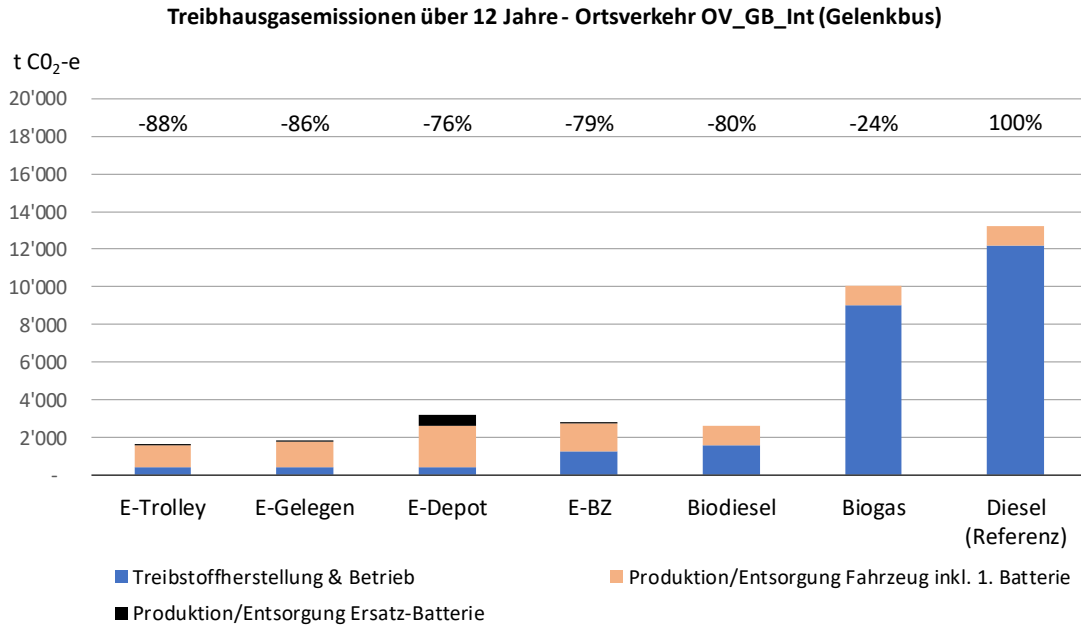
4.4.1. Treibhausgasemissionen

Die Abbildung 26 zeigt das Treibhausgasreduktionspotenzial der nicht fossilen Antriebsoptionen gegenüber dem Diesibus am Beispiel einer Ortsverkehrslinie mit Gelenkbussen und einer Regionalverkehrslinie mit Standardbussen. Daraus geht hervor, dass dieses Potenzial sowohl für den Orts- als auch den Regionalverkehr in derselben Grössenordnung liegt. Gleiches gilt auch für die übrigen, hier nicht explizit dargestellten Fallbeispiele. Zu den verschiedenen Antriebsoptionen kann folgendes festgestellt werden:

- Das Treibhausgasreduktionspotenzial der mit erneuerbarem Strom betriebenen Elektrobusse liegt zwischen 75% und 90%.
- Innerhalb der Batteriebusse schneiden die Gelegenheitslader mit den kleineren Batterien leicht besser ab (Reduktion um 85–90%) als der Depotlader mit seinen grossen Batterien (Reduktion um 75–80%), welche bei der Herstellung höhere THG-Emissionen aufweisen.
- Der Brennstoffzellenbus hat trotz kleinerer Batterie ähnlich hohe THG-Emissionen wie der Depotlader, weil auch die Herstellung der Brennstoffzelle und des Wasserstoffs entsprechende THG emittieren.
- Das Reduktionspotenzial des Biodiesels ist vergleichbar mit demjenigen des Depotladers und der Brennstoffzelle, unter der Annahme, dass Biodiesel aus UCO (Used Cooking-Oil) hergestellt wird.²⁶
- Mit Biogas betriebene Busse haben verglichen mit den übrigen Optionen nur ein geringes Treibhausgasreduktionspotential von ca. 20%. Der Grund liegt beim sogenannten Methanschluß bei der Biogasherstellung. Die hier unterstellten Annahmen aus ecoinvent v3.6 scheinen eher konservativ angesetzt, denn neuere Anlagen weisen bezüglich Methanschluß deutlich bessere Werte auf. Das Treibhausgasreduktionspotential von Biogas wird hier entsprechend unterschätzt.

²⁶ Dieser Treibstoff wird sicher nicht für alle ÖV-Busse der Schweiz ausreichen, kann aber auf einzelnen Linien durchaus eine Option sein. Mehr zu erneuerbaren Treibstoffen im Annex A3

Abbildung 26: Treibhausgasreduktionspotenzial fossilfreier Antriebsoptionen gegenüber Dieselbus (=100%)



Ladeinfrastruktur jeweils nicht berücksichtigt; beim Vergleich der beiden Fallbeispiele für einen Gelenkbus und einen Standardbus ist zu beachten, dass die Anzahl Busse nicht identisch ist (Fallbeispiel oben mit 8 Gelenkbussen und Fallbeispiel unten mit 3 Standardbussen). Der Unterschied der THG-Emissionen zwischen einem Gelenk- und einem Standardbus ist somit nicht direkt ablesbar.

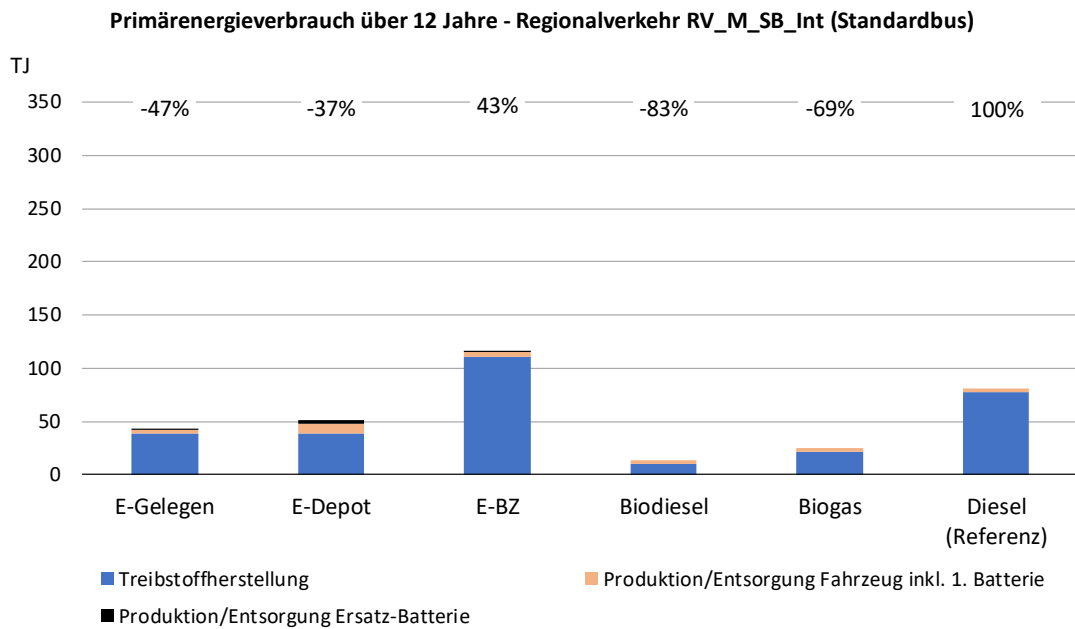
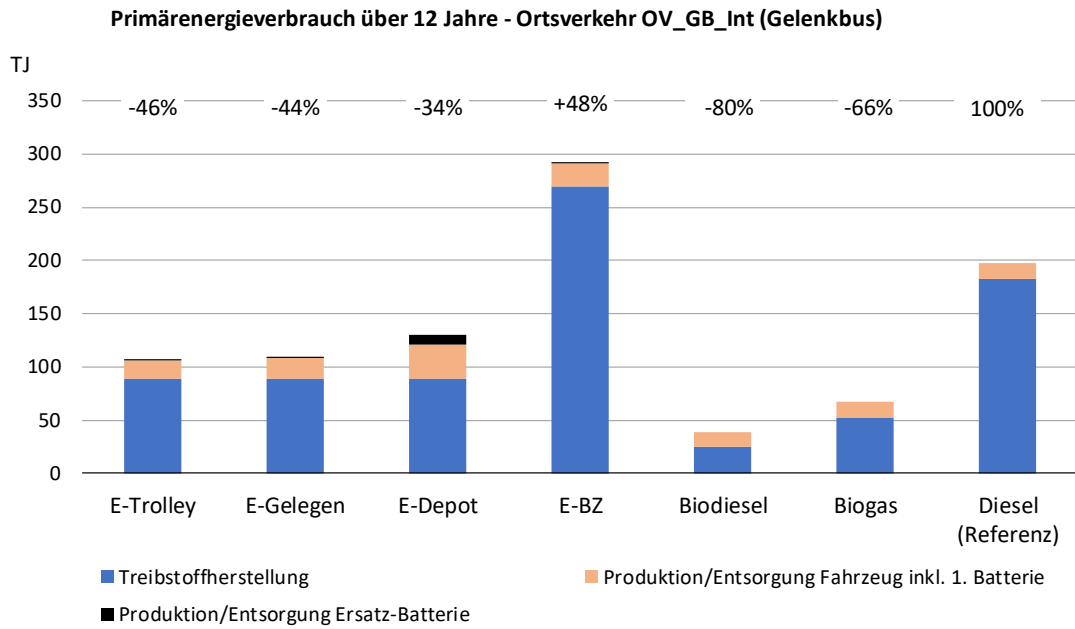
Grafik INFRAS.

4.4.2. Primärenergieverbrauch

Die Abbildung 27 zeigt den Primärenergieverbrauch der nicht fossilen Antriebsoptionen gegenüber dem Dieselbus am Beispiel einer Ortsverkehrslinie mit Gelenkbussen und einer Regionalverkehrslinie mit Standardbussen. Daraus geht hervor, dass der Primärenergiebedarf sowohl für den Orts- als auch den Regionalverkehr in derselben Grössenordnung liegt. Gleiches gilt auch für die übrigen, hier nicht explizit dargestellten Fallbeispiele. Zu den verschiedenen Antriebsoptionen kann folgendes festgestellt werden:

- Generell resultiert der grösste Anteil aus der Herstellung des Treibstoffs bzw. des Stroms. Die Bandbreite reicht von einem Anteil von 70% beim Depotlader bis 95% beim Biodiesel. Der Anteil aus der Herstellung des Fahrzeugs und der Batterie bzw. Brennstoffzelle ist entsprechende gering.
- Die drei Batteriebus-Optionen reduzieren den Primärenergiebedarf gegenüber dem Dieselbus um 40–50%. Dabei schneiden die beiden Gelegenheitslader wegen der kleineren Batterie tendenziell etwas besser ab als der Depotlader mit grosser Batterie.
- Demgegenüber führt die Option Brennstoffzelle zu einem Mehrbedarf an Primärenergie gegenüber dem Dieselbus von 40–50%. Der Grund liegt bei der energieintensiven Herstellung von Wasserstoff.
- Die Optionen Biodiesel (aus gebrauchtem Speiseöl bzw. UCO) und Biogas reduzieren gemäss Abbildung 27 den Primärenergiebedarf gegenüber dem Dieselbus noch stärker als die Batteriebusse, nämlich um über 60%. Hierbei ist die unterstellte Systemgrenze zu beachten. Denn hier ist nur der letzte Schritt der Aufbereitung von Biodiesel (Veresterung) und Biogas (Vergärung Klärschlamm) enthalten. Es handelt sich dabei um die sogenannte «cut-off»-Methodik bzgl. Systemgrenzen von Recycling- und Abfallprodukten. Das bedeutet im Zusammenhang mit der Ermittlung des Primärenergiebedarfs von Biodiesel und -gas, dass der Energieinhalt der Rohstoffe nicht den Biotreibstoffen zugeschlagen werden, sondern den vorgelagerten Prozessen.

Abbildung 27: Primärenergieverbrauch fossilfreier Antriebsoptionen gegenüber Dieselbus (=100%)



Ladeinfrastruktur jeweils nicht berücksichtigt

Grafik INFRAS.

4.4.3. Lokale Luftschadstoffemissionen

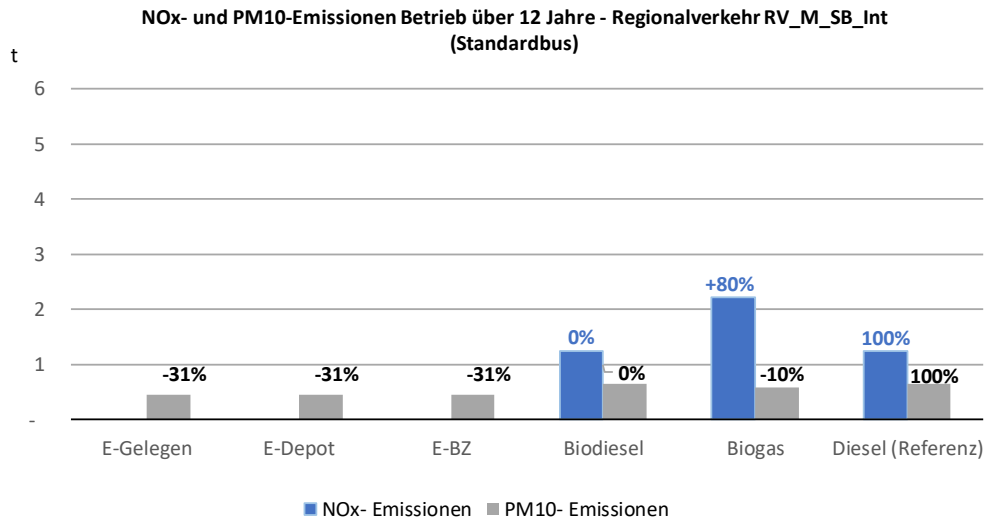
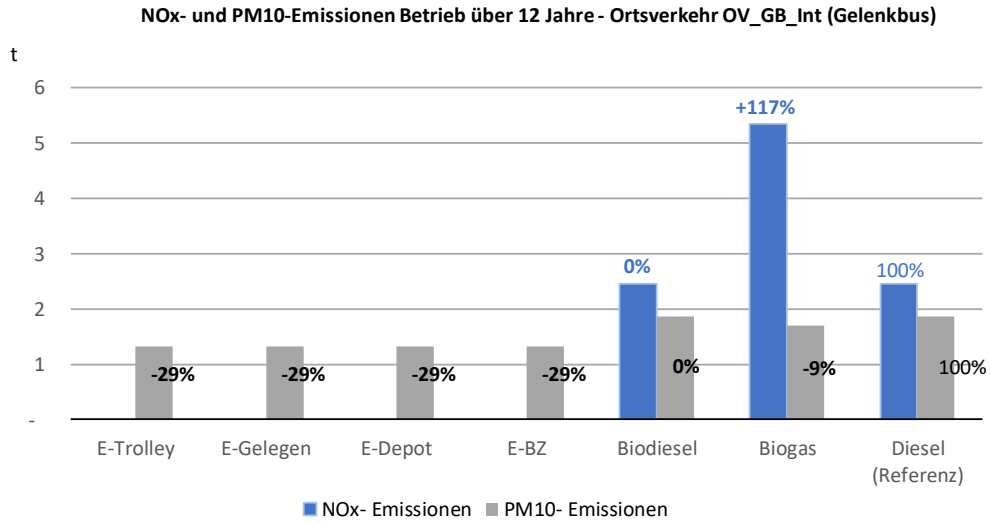
Die Abbildung 28 zeigt die Auswirkungen auf die lokalen Luftschadstoffe der nicht fossilen Antriebsoptionen gegenüber dem Dieselbus am Beispiel einer Ortsverkehrslinie mit Gelenkbussen und einer Regionalverkehrslinie mit Standardbussen. Wie beim Primärenergiebedarf und auch bei den Treibhausgasemissionen zeigt sich über all die Fallbeispiele ein ähnliches Bild. Zu den verschiedenen Antriebsoptionen kann folgendes festgestellt werden:

- Die Batterie- und Brennstoffzellenbusse haben im Betrieb keine NO_x-Emissionen. Der Biodieselbus ist vergleichbar mit dem konventionellen Dieselbus. Biogas hingegen führt zu zusätzlichen Stickoxid-Emissionen. Diese Aussage basiert auf Messungen der TU Graz für CNG- und Diesel-Busse, die in HBEFA 4.1 eingeflossen und für Schweizer Fahrverhältnisse gerechnet sind.
- Bei den PM10-Emissionen ist zu unterscheiden nach Emissionen aus den Abgasen und Emissionen aus «nicht-Abgasen», d.h. aus Aufwirbelungen und auch aus dem Bremsen- und Reifenabrieb. Bei den Elektrobussen sind die PM10 aus Abgasen gleich Null. Die Emissionen aus dem Bremsabrieb sind aufgrund der Rekuperationsmöglichkeit ca. halb so gross wie bei einem Bus mit Verbrennungsmotor.²⁷ Reifen- und Strassenabrieb bzw. Aufwirbelung sind hingegen vergleichbar zwischen Elektrobussen und Dieselbussen. In Realität entsteht bei E-Bussen möglicherweise ein etwas höheren Reifenabrieb, weil beim Anfahren ein grösseres Drehmoment an den Rädern zur Verfügung steht und rascher beschleunigt werden kann. Insgesamt führen damit die Elektrobusse zu einer Reduktion bei den PM10-Emissionen von rund 30% gegenüber dem Dieselbus.

Aus Sicht der lokalen Luftschadstoffemissionen liegen die Effekte für den Orts- und Regionalverkehr in ähnlichen Grössenordnungen. Immissionsseitig bzw. aus Sicht der Betroffenen sind jedoch die Effekte im Ortsverkehr grösser als Regionalverkehr, weil aufgrund der dichteren Siedlungsgebiete auch mehr Personen profitieren (bzw. im Fall von Biogas mehr Personen von den erhöhten Stickoxiden betroffen sind).

²⁷ Quelle: Althaus H.J. and Gauch M. 2010. Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität. Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio- und fossilen Treibstoffen. Empa, Dübendorf, CH. DOI: 10.13140/RG.2.1.4191.8482.

Abbildung 28: Luftschadstoff-Emissionen fossilfreier Antriebsoptionen im Betrieb ggü. Dieselbus (=100%)



Grafik INFRAS.

4.4.4. Lärmemissionen

Lärm von Bussen wirkt einerseits auf die Fahrgäste und andererseits auf die Personen, die ausserhalb des Busses dem Lärm ausgesetzt sind. Für den zweiten Fall sind wiederum der Lärm der Busse in Fahrt und der Lärm der Busse im Stehen an den Haltestellen (inkl. Lärm von Ladestationen / Ladevorgängen) zu unterscheiden. Detailliertere Informationen zu Lärm finden sich in Anhang A4.

Befragungen von Passagieren von Elektrobussen haben gezeigt, dass diese als ruhiger und darum komfortabler eingeschätzt werden als Dieselbusse. Dies deckt sich mit dem Umstand, dass der Motorenlärm, der immer auch im Fahrzeug zu hören ist, bei E-Bussen praktisch wegfällt.

Auch im Betrieb macht das Wegfallen des Motorenlärms einen Unterschied. Der ist besonders deutlich bei geringem Tempo (Anfahren, Stadtverkehr) sowie bei Bergfahrten. Bei höheren Geschwindigkeiten überwiegt der Anteil des Rolllärms, der für Diesel- und E-Busse praktisch gleich ist. Grundsätzlich kann man auch sagen, dass an einer stark befahrenen, lauten Strasse der Beitrag eines Diesel oder E-Busses zur Emission der Strasse gering ist, während der Beitrag an einer wenig befahrenen, leisen Strasse bei einem Dieselbus relativ gross und beim E-Bus deutlich kleiner sein kann. Mit anderen Worten macht der Ersatz von Dieselbussen durch E-Busse in Quartieren und in den Randstunden bezüglich Lärmes einen besonders grossen Unterschied.

Beim Warten an den Haltestellen sind E-Busse ebenfalls ruhiger als Dieselbusse mit laufendem Motor. Geräusche werden gegebenenfalls durch die Klimaanlage bzw. Lüftung verursacht. Bei Gelegenheitsladern kann es auch durch die Kühlung der Ladeinfrastruktur zu für die AnwohnerInnen lästigen Lärmemissionen kommen. In solchen Fällen ist auf eine gute Schallisolation der Kühlanlagen zu achten.

4.5. CO₂-Vermeidungskosten

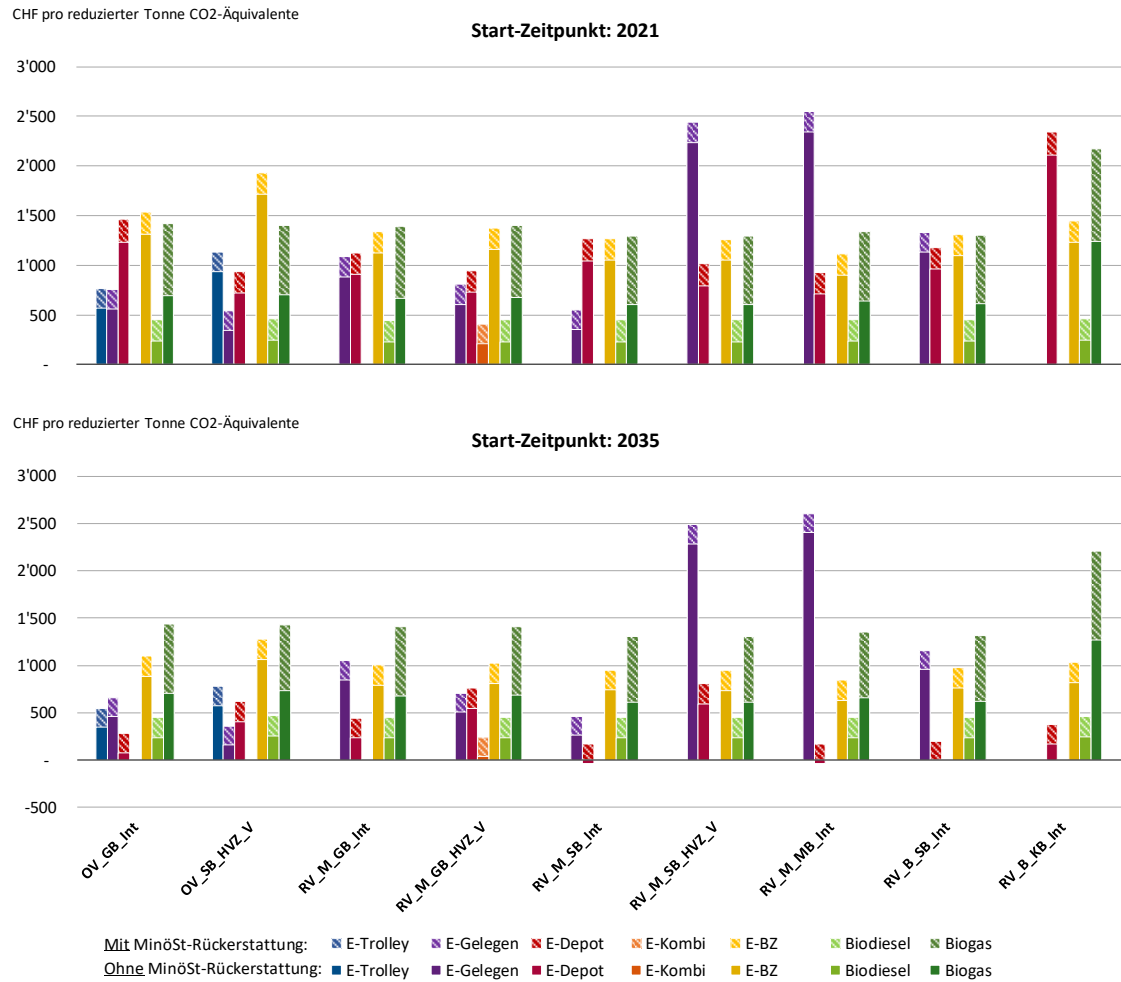
Die Abbildung 29 zeigt, basierend auf den Ergebnissen der Auswirkungsanalyse zu den Mehrkosten (Kapitel 4.3) und den CO₂-Reduktionspotenzialen (Kapitel 4.4.1), die Vermeidungskosten pro Tonne CO₂. Die kurzfristig günstigsten fossilfreien Antriebsoptionen weisen Reduktionskosten in der Grössenordnung von 500 CHF pro Tonne CO₂-Äquivalent auf, bei heutigen Rahmenbedingungen mit Mineralölsteuerrückerstattung im ÖV. Es sind dies der Biodieselbus, der Batteriebus als Gelegenheitslader statisch, sofern keine zusätzlichen Fahrzeugumläufe notwendig sind, und der Kombilader bei entsprechenden Rahmenbedingungen. Auch beim Batterie-Trolleybus sind Reduktionskosten in der Grössenordnung von 500 CHF pro Tonne CO₂ bereits kurzfristig möglich, sofern keine oder nur wenige zusätzliche neue Oberleitungen erforderlich sind. Im Vergleich zu anderen Sektoren scheinen diese Vermeidungskosten hoch. Beispielsweise

werden für Einzelmassnahmen im Gebäudebereich Vermeidungskosten von höchstens rund 140 CHF/tCO₂ ausgewiesen (Ecoplan 2012). Allerdings ist hierbei die Methodik zur Ermittlung der Vermeidungskosten relevant. Beim Vergleich der Vermeidungskosten ist zudem der Referenzfall entscheidend. Die CO₂-Vermeidungskosten von Elektrobussen sind unter den aktuellen Rahmenbedingungen für Dieselbusse im öffentlichen Verkehr hauptsächlich deshalb so hoch, weil heute mit der Mineralölsteuerrückstattung ein finanzieller Fehlanreiz besteht, der den Referenzfall (Dieselbus) künstlich günstiger erscheinen lässt.

Ebenso ist zu berücksichtigen, dass die Vermeidung von Treibhausgasemissionen nicht das einzige ökologische Argument für die Umstellung von Bussen auf erneuerbare Antriebe ist. So helfen Elektrobusse, weitere externe Kosten in den Bereichen Lärm und Luftschadstoffe zu vermeiden, dies im Gegensatz zu mit Biotreibstoffen angetriebenen Bussen. Die Mehrkosten sollen daher nicht nur in Bezug zur CO₂-Reduktion betrachtet werden.

Längerfristig (Horizont 2030/2035) sind mit dem Depotlader in Einsatzfeldern, in welchen die dazumaligen Reichweiten von rund 350 km/Ladung ausreichen, sowie mit den Gelegenheitsladern unter idealen Einsatzbedingungen Vermeidungskosten unter 200 CHF pro Tonne CO₂ und damit auch deutlich unter dem Biodiesel möglich. Würde die Mineralölsteuerrückstattung aufgehoben, wären die Batteriebusse im Horizont 2030/2035 nicht mehr teurer als die Dieselbusse; d.h. die Vermeidungskosten sinken gegen Null (vgl. Abbildung 29).

Abbildung 29: Reduktionskosten pro Tonne CO₂-Äquivalent kurz/langfristig, mit/ohne MinöSt-Rückerstattung



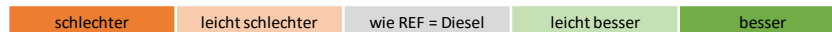
Grafik INFRAS.

4.6. Weitere Kriterien

Die folgende Abbildung zeigt die qualitative Bewertung weiterer Kriterien in einer Übersicht. Erläuterungen zu den einzelnen Aspekten folgen anschliessend.

Abbildung 30: Qualitative Bewertung weiterer Kriterien

	Qualitative Bewertung gegenüber Dieselbus					
	Batterie-Trolley	E-Gelegen	E-Depot	E-BZ	Biodiesel	Biogas
Betrieb/Angebot						
▪ Flexibilität Fahrzeug-Gesamtflotte			*			
▪ Interventionen bei Betriebsstörungen						
▪ Personaleinsatz/Dienstplanung						
▪ Angebotsplanung/Flexibilität			*			
▪ 24h-Betrieb						
▪ Einsatz von Doppelgelenkbussen						
▪ Anpassungen Garagen/Werkstätten						
Stadtraum						
Fahrgastkomfort						
Umsetzungs-/Genehmigungsverfahren						



* bei genügend Reichweite

Grafik INFRAS.

Erläuterungen zu betrieblichen und angebotsplanerischen Aspekten

- Flexibilität Fahrzeug-Gesamtflotte
 - Vorteile bei den E-Bussen für den Depotlader (z.B. Bahnersatz, Ersatzbetrieb bei Baustellen, Extrafahrten, Shuttle-Angebote bei Anlässen), weil er nicht von einer streckengebundenen Ladeinfrastruktur abhängig ist und längerfristig Reichweiten von mind. 350 km aufweist.
 - Der Brennstoffzellen-Bus und die Biodiesel-/Biogasbusse weisen dieselbe Einsatzflexibilität wie der Dieselbus auf.
- Interventionen bei Betriebsstörungen (z.B. Verspätungen, Streckenblockierungen)
 - Depotlader haben Vorteile, da vorzeitiges Wenden flexibler möglich ist. Beim Gelegenheitslader statisch wären Zwischenladestationen erforderlich mit entsprechenden Kostenfolgen; beim Batterietrolleybus wäre das Oberleitungsnetz darauf auszurichten, was u.U. einen höheren Anteil Oberleitung bedeuten kann. Erschwerend für die Disposition im Störfall kann sich beim Depotlader die jeweils unterschiedlichen Batterieladestände bzw. möglichen Restreichweiten auswirken.

- Der Brennstoffzellen-Bus und die Biodiesel-/Biogasbusse weisen dieselbe Einsatzflexibilität wie der Dieselbus auf.
- Personaleinsatz/Dienstplanung
 - Depotlader können sich nachteilig auf die Personaleinsatzkonzepte auswirken, da Fahrzeug austauschkonzepte mehr Kurzdienste bzw. «gestückelte» Dienste nach sich ziehen. Dieser Nachteil relativiert sich auf der Zeitachse bzw. mit zunehmenden Reichweiten.
- Angebotsplanung/Flexibilität
 - Depotlader weist ähnliche Voraussetzungen auf wie Dieselbus bzw. die nicht fossilen Alternativen Brennstoffzellen- und Biodiesel-/Biogasbus.
 - Beim Gelegenheitslader statisch führt das Ladekonzept zu eingeschränkter Flexibilität:
 - Für Durchmesserlinien an ÖV-Knoten wenig geeignet, weil Zwischenladungen zu längeren Aufenthaltszeiten im Zentrum führen, was aus Kundensicht nicht attraktiv ist;
 - Bei Linienverlängerungen oder Verkürzungen (z.Bsp. für Verdichtungsangebote) müssen Ladestationen versetzt oder zus. Ladestationen erstellt werden.
 - Konzeptänderungen können zu veränderten Wendezeiten und u.U. zu ungenügenden Ladezeiten führen.
 - Auch der Batterietrolleybus ist aufgrund der Fahrleitung eingeschränkt, weist jedoch dank der Möglichkeit des fahrleitungslosen Betriebs über mehr Flexibilität hinsichtlich Linienverlängerungen/Linienverknüpfungen als der Gelegenheitslader statisch auf.
- 24h-Betrieb
 - Die notwendigen Nachladezeiten in der Garage schränken die Einsatzflexibilität der Depotlader für einen 24-Stundenbetrieb ein (z. Bsp. für Nachtangebote an Wochenenden oder mehrtägigen Stadtfeste mit Sonderfahrplänen)
 - Zwar werden die Batteriekapazitäten in Zukunft laufend zunehmen. Gleichzeitig erhöht sich aber auch die Ladezeit. Für Busse, welche über Nacht nur 4-5h im Depot stehen, ist das Ladezeitfenster u.U. dann zu kurz. Dies würde dazu führen, dass zusätzliche Fahrzeuge notwendig werden. Oder die Ladeleistung in den Depots müsste deutlich über 150 kW sein. Berücksichtigt werden muss auch die Vorkonditionierung der Batterie (ca. 1/2h vor Ausrücken) und die Rangierzeit (ca. 1/2h nach Einrücken). Dadurch reduziert sich die verfügbare Ladezeit um ca. 1h.
- Einsatz von Doppelgelenkbussen:
 - Der Batterietrolleybus bietet gute Voraussetzungen für den Einsatz von Doppelgelenkbussen (würde beim Depotlader sehr grosse Batterien bzw. ungenügende Reichweiten be-

deuten, beim Gelegenheitslader zu langen Ladezeiten am Linienende und damit zusätzlichen Umläufen). Der Einsatz von Doppelgelenkbussen ist theoretisch auch mit Diesel oder Gasbussen möglich, wird jedoch bisher am Markt wenig praktiziert

- Anpassungen Garagen/Werkstätten:
 - Für die E-Busse sind v.a. die entsprechenden Ladeinfrastrukturen inkl. Stromversorgung mit entsprechendem Platzbedarf bereitzustellen.
 - Beim Biodieselbus sind Biodiesel-Tankstellen zu erstellen.
 - Beim Biogasbus müssen Gastankstellen errichtet und Vorkehrungen im Kontext Explosionsschutz getroffen werden.

Erläuterungen zum Aspekt Stadtraum

- Oberleitungen und Ladestationen können den Stadtraum in (denkmalpflegerisch) heiklen Gebieten beeinträchtigen (v.a. in Ortszentren). An besonders heiklen Orten kann jedoch beim Batterietrolleybus auf eine Oberleitung verzichtet werden.
- Ladestationen für Gelegenheitslader statisch stellen an ÖV-Knotenpunkten (z. Bsp. Bahnhöfe) hohe Anforderungen an den Platzbedarf, der oftmals nicht gegeben ist (mehrere Linien treffen i.d.R. aus Anschlussgründen gleichzeitig ein => Synergien für Mehrfachbenutzung der Ladestationen durch mehrere Linien nicht gegeben).

Erläuterungen zum Aspekt Fahrgastkomfort

- Die drei Batteriebusoptionen und der Brennstoffzellenbus sind gleichwertig und weisen Vorteile dank ruhigerer, komfortabler Fahrweise und weniger Innenlärm gegenüber den Antriebsformen mit Verbrennungsmotor auf. Diese Einschätzung wird in Kundenbefragungen im Zusammenhang mit E-Bus-Testbetrieben bestätigt.

Erläuterungen zu Umsetzungs-/Genehmigungsverfahren

- Hier werden v.a. die E-Busoptionen mit Ladeinfrastrukturen im öffentlichen Raum, das heisst der Batterietrolleybus mit zusätzlichen Oberleitungen und der Gelegenheitslader statisch mit Ladestationen entlang der Linie, negativ bewertet. Denn bei diesen ist mit erheblich grösseren Einsparrisiken mit entsprechend aufwändigeren Bewilligungsverfahren zu rechnen verglichen mit den übrigen Optionen, welche ausschliesslich Infrastrukturen innerhalb der Betriebshöfe der Transportunternehmen aufweisen.

4.7. Anforderungen an die Stromversorgung für Batteriebusse

Vor allem das Depotlade-Konzept mit Nachladen der Batterien über Nacht bedingt höhere Stromanschlussleistungen in den Busgaragen, als dies heute der Fall ist. Damit beispielsweise 30 Busse mit einer Ladeleistung von 150 kW gleichzeitig geladen werden können, ist eine Anschlussleistung von 4-5 MW erforderlich. An den typischen Standorten von Busdepots sowohl in der Stadt als auch in der Region (Gewerbe-/Industriegebiete) ist in der Regel eine Anschlussleistung von 5 MW möglich. Wichtig vor allem zum Brechen von Leistungsspitzen sind intelligente Lademanagementsysteme in den Busgaragen, um den Leistungsbedarf zu minimieren.

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

Bei den Trolleybussen mit dynamischen Gelegenheitsladern wird sich der Leistungsbedarf ab Oberleitung gegenüber derjenigen von klassischen Trolleybussen etwa verdoppeln, weil nebst dem Strom fürs Fahren auch Strom zum Laden der Batterie benötigt wird. Speziell auf Streckenabschnitten, die von mehreren Linien genutzt werden, kann so eine Verstärkung der Einspeiseleistung (oder kürzere Einspeiseabschnitte) nötig werden. Denn die Einspeiseleistung ist u.a. abhängig vom Anteil Oberleitung entlang einer Strecke. Minimiert man diesen Anteil, steigen die Anforderungen an die Lade- bzw. Einspeiseleistung.

4.8. Wichtigste Erkenntnisse – Zusammenfassung

Abbildung 31 zeigt das Ergebnis der Auswirkungsanalyse in Form von Bewertungsprofilen für die fossilsfreien Antriebsoptionen als Alternativen zum Dieselbus. Daraus ergeben sich zusammenfassend folgende wichtigsten Erkenntnisse:

- Aus ökologischer Sicht weisen die Batterie-Busse klare Vorteile auf, sowohl bei den THG-Emissionen und dem Primärenergiebedarf als auch bei den lokalen Luftschadstoffen und beim Lärm in den Quartieren. Emissionsseitig bewegen sich die positiven Effekte bei den lokalen Umweltbelastungen im Orts- und Regionalverkehr in ähnlichen Grössenordnungen. Immissionsseitig bzw. aus Sicht der Betroffenheit sind jedoch die Effekte beim Ortsverkehr grösser als beim Regionalverkehr, weil aufgrund der dichteren Siedlungsgebiete auch mehr Personen profitieren.

Elektrobusse, insbesondere Depotlader mit grossen Batterien, benötigen im Vergleich zu Dieselbussen mehr potenziell kritische Materialien. Die relevantesten sind Lithium, Kobalt, Graphit und Seltene Erden. Die ersten drei sind vor allem in den Batterien enthalten, seltene

Erden vorwiegend in den Elektromotoren. Mit den heute bekannten Recyclingverfahren können diese Materialien zu fast 100% zurückgewonnen werden. Bei Busbatterien darf aufgrund des in der Batterie gespeicherten Materialwerts davon ausgegangen werden, dass ein Recycling am Lebensende tatsächlich stattfinden wird. Trotzdem kann bei wachsendem Bestand an Batteriefahrzeugen (v.a. im PW-Bereich) die Nachfrage nach diesen Materialien so stark steigen, dass sich langfristig Knappheiten ergeben. Da all diese Materialien in Elektrofahrzeugen aber substituierbar sind, werden auf jeden Fall Optionen bestehen, mit allfälligen Knappheiten umzugehen.

Die Biotreibstoffe weisen zwar einen geringeren Primärenergiebedarf als alle anderen Optionen auf (unter Anwendung der sog. «cut-off»-Methodik bzgl. Systemgrenzen von Recycling- und Abfallprodukten). Sie haben aber ein geringeres THG-Reduktionspotenzial (Biogas) als Elektrobusse und bringen gegenüber Dieselnissen keine massgebenden Verbesserungen bei den lokalen Luftschadstoffemissionen und beim Lärm (Biogas und Biodiesel).

Der Brennstoffzellenbus schneidet bzgl. THG und lokaler Luftschadstoffe praktisch gleich ab wie die Batteriebusse, weist aber einen sehr hohen Primärenergiebedarf auf.

- Kostenmässig ist zu unterscheiden nach der kurzfristigen Situation und den absehbaren Entwicklungen. Ebenso sind die preislichen Rahmenbedingungen relevant, die zum Teil auch von regulatorischen Festlegungen abhängen (z. Bsp. Mineralölsteuer-Rückerstattung, vgl. dazu Ausführungen in Kap. 5). Unter den heutigen Rahmenbedingungen sind die Batteriebusse kurzfristig noch vergleichsweise teuer und die Einsatzpotenziale für zweckmässige Einsätze noch beschränkt (v.a. für den Depotlader). Längerfristig haben die Batteriebusse aber das Potenzial, je nach Einsatzbedingungen und Annahmen zur Batterie-Lebensdauer die kostengünstigsten Optionen zu werden. Positiv zugunsten der Batteriebusse würde sich auch die Aufhebung der Mineralölsteuer-Rückerstattung auswirken.

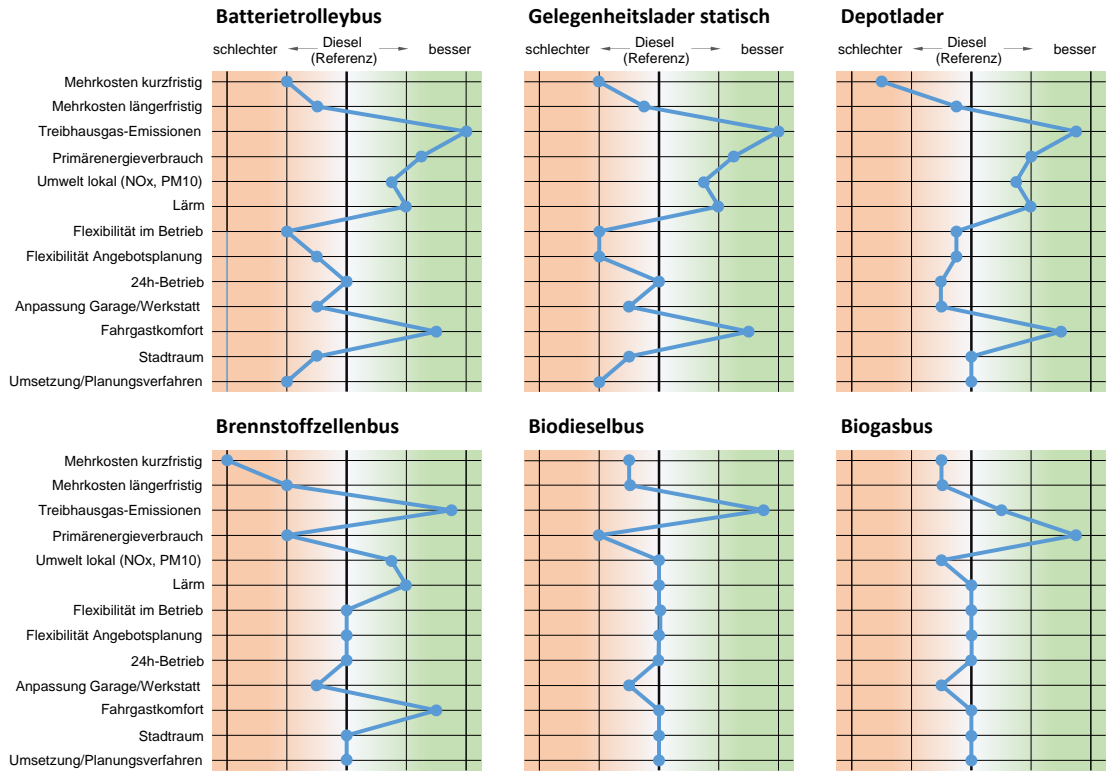
Kurzfristig stellen die Biotreibstoffe tendenziell die günstigsten Optionen dar. Fraglich ist jedoch, ob in einer Übergangsphase, bis die Vorteile der Batterie-Busse voll zum Tragen kommen, auf diese Optionen umgeschwenkt werden soll (Errichtung von Biodiesel- oder Biogastankstellen, Werkstattanpassung/Personalumschulungen für Übergangstechnologie). Gegen Biotreibstoffe spricht auch die beschränkte Verfügbarkeit insbesondere für in der Schweiz hergestellte Biotreibstoffe. CH-Biodiesel aus UCO (Used Cooking-Oil) dürfte beispielsweise nicht für alle ÖV-Busse der Schweiz ausreichen und könnte somit höchstens auf einzelnen Linien eine Option darstellen. In diesem Zusammenhang stellt sich deshalb auch die Frage, ob aus einer Gesamtsicht über den öffentlichen Verkehr hinaus die Verwendung von Biotreibstoffen in Bereichen im Vordergrund stehen soll, wo andere Alternativen für eine Reduktion der THG-Emissionen zurzeit noch fehlen (z. Bsp. Langstrecken-LKW, Hochseeschiffe, Flugverkehr; vgl. dazu auch Ausführungen im Annex A3.1 ab Seite 216).

Analoges hinsichtlich Sinnhaftigkeit als Übergangstechnologie gilt auch für Plug-in-Hybridbusse mit Biotreibstoffen.

Aus einer Gesamtbetrachtung Kosten und Umwelt sollen folglich **Elektrobusse als fossilfreie Alternative zu den Dieselnissen im Fokus** stehen, dies bereits kurz-/mittelfristig, allerdings nur für aus Kostensicht zweckmässige Einsätze. Längerfristig wird sich aufgrund der absehbaren Entwicklungen bei den Batteriebusen, sowohl in technischer Hinsicht als auch bzgl. Kosten, das Potenzial für zweckmässige Einsätze sowohl im Orts- als auch im Regionalverkehr stark erhöhen. Damit sinken auch die kurzfristig vergleichsweise hohen CO₂-Vermeidungskosten der Elektrobusse deutlich auf Werte unter 200 CHF pro Tonne CO₂. Bei einer Aufhebung der Mineralölsteuerrückerstattung sinken sie – unter idealen Einsatzbedingungen – sogar gegen Null. Im Zusammenhang mit den vor allem kurzfristig noch hohen CO₂-Vermeidungskosten ist zu berücksichtigen, dass Elektrobusse helfen, weitere externe Kosten in den Bereichen Lärm und Luftschadstoffe zu vermeiden, dies im Gegensatz zu mit Biotreibstoffen angetriebenen Bussen. Die Mehrkosten sollen daher nicht nur in Bezug zur CO₂-Reduktion betrachtet werden.

Welche E-Bus-Optionen – Batterietrolleybus, Depotlader, Gelegenheitslader statisch oder auch der Brennstoffzellenbus, wenn bspw. grosse Einsatzreichweiten über 400-500 km pro Tag erforderlich sind – im Vordergrund stehen, hängt jeweils von den spezifischen Umfeldbedingungen einer Linie oder eines Liniennetzes sowie den lokalen Voraussetzungen ab. Dies kann bzw. soll auch nicht in dieser Grundlagenstudie vorgegeben werden.

Abbildung 31: Bewertungsprofile der untersuchten fossilfreien Antriebsoptionen



Grafik INFRAS

5. Regulatorische Rahmenbedingungen, ÖV-Finanzierung und Fördermöglichkeiten

5.1. Vorbemerkungen

Förderinstrumente können Anreize auf der Seite der Nachfrage («pull-effect») oder des Angebots («push-effect») setzen. Der Fokus der Grundlagenstudie liegt – im Sinne des Postulats – auf nachfrageseitigen Förderungen und insbesondere den finanziellen Massnahmen (Tabelle 12). Bei den finanziellen Massnahmen unterscheiden wir zwischen direkten und indirekten Massnahmen. Direkte, finanzielle Massnahmen verstehen wir als Subventionen oder Förderbeiträge (im Sinne von Einnahmen) sowie Darlehen.²⁸ Indirekte, finanzielle Massnahmen können beispielsweise Steuer- oder Abgabenerleichterungen und -rückerstattungen oder Bürgschaften sein, die zu einer Reduktion der Kosten führen.

Finanzielle Fördermassnahmen auf der Nachfrageseite können verschiedene Ziele verfolgen:

- Förderung der Entwicklung und Erprobung neuer, energieeffizienter und fossilfreier Fahrzeugtechnologien und entsprechender Betankungs- bzw. Ladeinfrastruktur (an der Schnittstelle von Hersteller und Betreiber)
- Förderung des beschleunigten kommerziellen Einsatzes neuer Fahrzeugtechnologien, d.h. zur Unterstützung der Einführung und des Wachstums im Markt (Diffusion), mit dem Ziel der
 - Erhöhung der Umweltwirkungen (z.B. Einsparung von Treibhausgasemissionen),
 - Reduktion der Stückkosten neuer Technologien durch Skaleneffekte,
 - Vorbildwirkung bei öffentlichen Beschaffungen.

²⁸ Denkbar wären auch Tarifmassnahmen zur Erhöhung der Erträge der konzessionierten Transportunternehmen (KTU). Da die Tarifautonomie bei den TU liegt, werden derartige Massnahmen in der vorliegenden Grundlagenstudie nicht berücksichtigt.

Tabelle 12: Systematisierung von nachfrageseitigen Fördermassnahmen ÖV

Massnahmentyp	Kategorie	Beispiele
Finanzielle Massnahmen	direkt	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Subventionen²⁹ der öffentlichen Hand (Finanzhilfen³⁰ und Abgeltungen³¹) ▪ Förderbeiträge privater Institutionen ▪ (rückzahlbare) Darlehen³²
	indirekt	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bürgschaften (zur Reduktion von Zinskosten) ▪ Erleichterungen oder Rückerstattungen von Steuern oder Abgaben (Unternehmens-, Fahrzeug- oder Leistungsbezogen) wie z.B. Verzicht Automobilsteuer für E-Fahrzeuge, Mineralölsteuerrückerstattung KTU ▪ unentgeltliche oder verbilligte Dienst- und Sachleistungen (z.B. Beratung)
Nicht-finanzielle Massnahmen	Regulierung und Standards	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Festlegung von Umweltstandards für Personenverkehrsdienste (Besteller) ▪ Festlegung von Umweltstandards für das Unternehmen (durch Eigner) ▪ Vorgaben bei Betriebsmittelbeschaffungen durch Gesetz, Eigner oder Besteller ▪ Vorgabe von Zuschlagskriterien für öffentliche Beschaffungen
	Information, Kommunikation und Kooperation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Informations- und Sensibilisierungskampagnen ▪ Angebot von Weiterbildungen ▪ Erfahrungsaustausch fördern (z.B. KKDöV) ▪ Testfahrten mit Fahrzeugen anderer KTU organisieren

KKDöV: Konferenz der kantonalen Delegierten des öffentlichen Verkehrs, KTU: Konzessionierte Transportunternehmen, ÖV: Öffentlicher Verkehr, QMS RPV: Qualitätssystem im regionalen Personenverkehr.

Tabelle INFRAS.

Im Vordergrund des Postulats 19.300 steht die beschleunigte Durchdringung von klimaneutralen Bussen in der Fläche. Vor diesem Hintergrund werden einerseits die aktuellen Rahmenbedingungen betreffend Finanzierung und Förderungen von fossilfreien Fahrzeugen und entsprechender Ladeinfrastruktur für die Schweiz (Kap. 5.2) und ausgewählte Fallstudien aus dem Ausland (Kap. 5.2.4) zusammengefasst.

²⁹ Subventionen sind Finanzhilfen und Abgeltungen.

³⁰ Finanzhilfen sind geldwerte Vorteile, die Empfängern ausserhalb der Bundesverwaltung gewährt werden, um die Erfüllung einer vom Empfänger gewählten Aufgabe zu fördern oder zu erhalten. Geldwerte Vorteile sind insbesondere nicht rückzahlbare Geldleistungen, Vorzugsbedingungen bei Darlehen, Bürgschaften sowie unentgeltliche oder verbilligte Dienst- und Sachleistungen (Art. 2 Abs. 1 SuG, SR 616.6).

³¹ Abgeltungen sind Leistungen an Empfänger ausserhalb der Bundesverwaltung zur Milderung oder zum Ausgleich von finanziellen Lasten, die sich ergeben aus der Erfüllung von bundesrechtlich vorgeschriebenen Aufgaben oder öffentlich-rechtlichen Aufgaben, die dem Empfänger vom Bund übertragen worden sind (Art. 3 Abs. 2 SuG, SR 616.1).

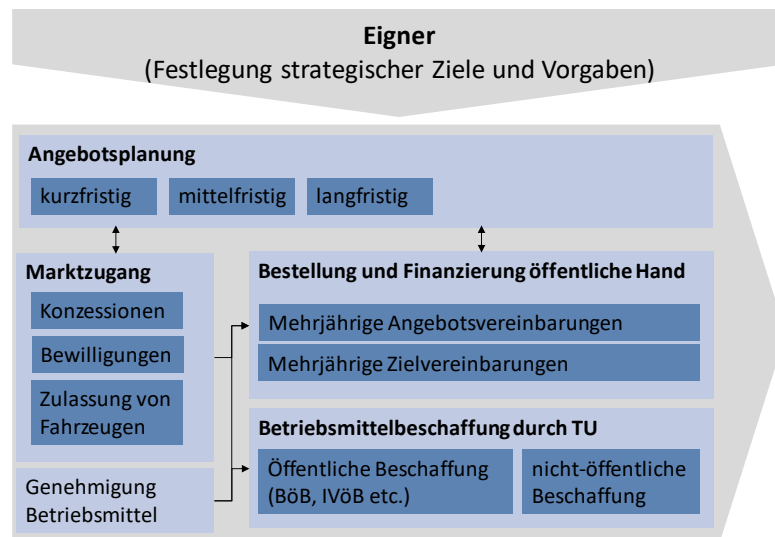
³² Darlehen der öffentlichen Hand gelten als Finanzhilfen, wenn damit geldwerte Vorteile (z.B. Zinssatz unter dem marktüblichen Niveau) verbunden sind.

5.2. Aktuelle Rahmenbedingungen sowie Finanzierung und Förderungen in der Schweiz

5.2.1. Regulatorische Rahmenbedingungen der Transportunternehmen und Finanzierung im ÖV

Die wichtigsten Prozesse im bestellten und finanzierten öffentlichen Verkehr sind in Abbildung 32 zusammenfassend als Übersicht dargestellt und werden im vorliegenden Kapitel kurz beschrieben. Grundsätzlich zu unterscheiden ist zwischen den Rahmenbedingungen aufgrund der rechtlichen Grundlagen und Bestimmungen der Konzessionsbehörde und den Bestellern von Leistungen im ÖV (Gewährleistungssicht) und den Vorgaben des Eigners für ein Transportunternehmen (Eignersicht). Auch wenn der Fokus der vorliegenden Studie auf der Finanzierung und Beschaffung von Bussen im abgeltungsberechtigten Personenverkehr liegt, hat ein Unternehmen insbesondere bei grösseren Investitionsentscheiden auch die Eignersicht und strategische Ziele zu berücksichtigen. Beispielsweise können finanzielle Vorgaben des Eigners zur maximalen Verschuldung eines Transportunternehmens Einfluss auf die Beschaffung von Betriebsmitteln und damit auch auf die Umstellung von alternativ angetriebenen Bussen haben.

Abbildung 32: Übersicht Prozesse und Rahmenbedingungen Finanzierung öffentlicher Verkehr



BöB: Bundesgesetz über das öffentliche Beschaffungswesen, IVöB: Interkantonale Vereinbarung über das öffentliche Beschaffungswesen.

Grafik INFRAS.

Zugang zum Markt und Zulassung von Fahrzeugen

Strassentransportunternehmen im Personenverkehr bedürfen einer Zulassungsbewilligung des Bundesamts für Verkehr (BAV) gemäss Bundesgesetz über die **Zulassung als Strassentransportunternehmen** (STUG) vom 20. März 2009. Diese wird erteilt, wenn das Unternehmen zuverlässig, finanziell leistungsfähig sowie fachlich geeignet ist.

Gestützt auf Art. 81a der Bundesverfassung (BV) sorgen Bund und Kantone für ein ausreichendes Angebot an öffentlichem Verkehr auf Schiene, Strasse, Wasser und mit Seilbahnen in allen Landesgegenden. Gestützt auf Art. 92 BV hat der Bund das ausschliessliche Recht, Reisende mit regelmässigen, gewerbsmässigen Fahrten zu befördern (Personenbeförderungsregal). Er kann natürlichen und juristischen Personen für die regelmässige, gewerbsmässige Personenbeförderung innerhalb der Schweiz eine Konzession erteilen (**Personenbeförderungskonzession**). Das Personenbeförderungsgesetz (PBG) vom 20. März 2009 regelt die dem Regal unterstehende Personenbeförderung. Die Verordnung über die Personenbeförderung (VPB) vom 4. November 2009 regelt die Einzelheiten. Die Konzessionen gelten i.d.R. für 10 Jahre (im betrachteten Busverkehr).³³ Aus Sicht der konzessionierten Transportunternehmen (KTU) bietet die Konzession einen Investitionsschutz, da die Konzessionsdauer die Dauer der Angebotsvereinbarung bei nicht-ausgeschriebenen Verkehrsangeboten deutlich übersteigt. Mit der Konzession für die regelmässige Personenbeförderung erfolgt keine Finanzierungszusicherung. Sie bildet jedoch die Grundlage für Abgrenzung der Marktbereiche und dadurch die jeweilige Zuständigkeit für Bestellung und Finanzierung von Angeboten im Personenverkehr.

Das BAV erteilt die **Zulassung von Strassenfahrzeugen** (sowie Schiffen) zum konzessionierten Betrieb und die Kantone erteilen die zusätzlich erforderliche Zulassung zum Strassenverkehr (Art. 25 VPB).

Fahrplanverfahren und Angebotsplanung

Mit der Konzession für die regelmässige Personenbeförderung sind die Transportunternehmen zur Aufstellung und Veröffentlichung von Fahrplänen gemäss Fahrplanverordnung (FPV) verpflichtet. Der Fahrplan legt das verbindliche, gesamtschweizerisch abgestimmte Angebot des öffentlichen Verkehrs für eine Fahrplanperiode, die i.d.R. 2 Jahre dauert, fest.

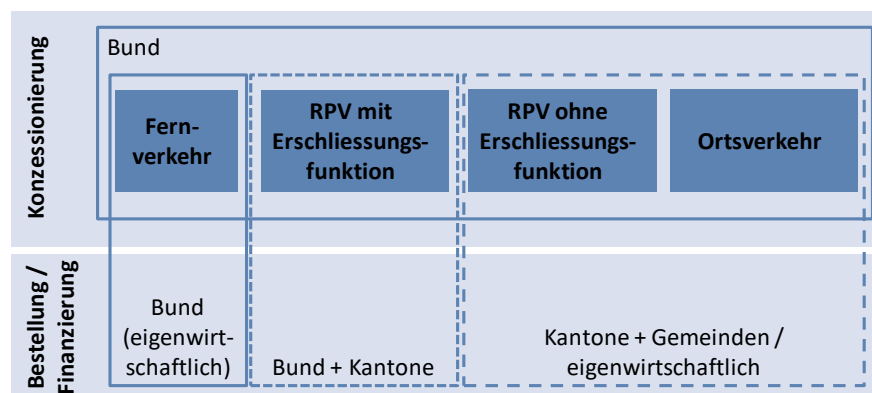
Auf Grundlage des Fernverkehrskonzepts der betroffenen Unternehmen ist der abgeltungsberechtigte Verkehr zu planen. Im Rahmen des Fahrplanverfahrens hören die Kantone die interessierten Kreise an. Die Besteller der abgeltungsberechtigten Angebote entscheiden, welche Angebote in den Fahrplan aufgenommen werden.

³³ Im erläuternden Bericht zur Reform RPV wurde die Harmonisierung der Konzessionsdauer (12 statt 10 Jahre) an andere Prozesse beabsichtigt (UVEK 2019). Eine Änderung des Konzessionsrechts wurde hingegen im Rahmen der Reform RPV nicht beabsichtigt. Derzeit läuft eine Evaluation des Konzessionsrechts im Auftrag des BAV.

Bestellung und Finanzierung von Verkehrsangeboten (Grundversorgung)

Die Zuständigkeiten betreffend Konzessionierung und Bestellung / Finanzierung unterscheiden sich (Abbildung 33). Die Bestellung und Finanzierung von Verkehrsangeboten teilen sich Bund, Kantone und Gemeinden. Da die Kantone den RPV und i.d.R. Ortsverkehr und RPV ohne Erschliessungsfunktion mitfinanzieren und das Fahrplanverfahren seitens Besteller im ÖV koordinieren, kommt ihnen eine zentrale Rolle zu.

Abbildung 33: Zuständigkeiten Konzessionierung und Bestellung / Finanzierung im ÖV



Grafik INFRAS.

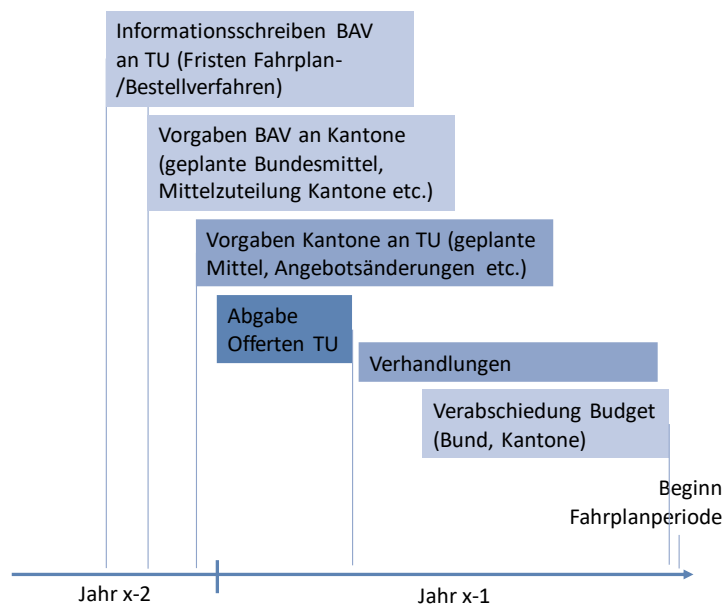
Die geplanten, ungedeckten Kosten des vom Bund bestellten **Angebots nationaler Bedeutung** trägt der Bund allein (Art. 28 Abs. 3 PBG). Das Mindestangebot im Fernverkehr wird aktuell mittels Personenbeförderungskonzession des Bundes festgelegt und nicht öffentlich finanziert (eigenwirtschaftlich). Insofern bestellt der Bund den Fernverkehr nicht. Mit der Personenbeförderungskonzession für den Fernverkehr wird jedoch nicht nur das Recht, sondern v.a. auch die Pflicht einschliesslich der Definition eines Mindestangebots und -qualität durch das BAV verfügt.

Bund und Kantone bestellen und finanzieren die geplanten, ungedeckten Kosten der Angebote des **regionalen Personenverkehrs (RPV) mit Erschliessungsfunktion** gemeinsam (Art. 28 Abs. 1 PBG). Bei der Festlegung des Verkehrsangebotes wird v.a. die Nachfrage berücksichtigt. Weitere Kriterien sind eine angemessene Grundversorgung, Anliegen der Regional- und Raumordnungspolitik, des Umweltschutzes und von Behinderten (Art. 31a Abs. 3 PBG). Können die Unternehmen aufgrund von Effizienzgewinnen oder höherer Nachfrage einen Ertragsüberschuss erzielen, so weist die TU mindestens zwei Drittel dieses Überschusses der Spezialreserve zur Deckung künftiger Fehlbeträge abgeltungsberechtigter Verkehrssparten zu. Erreicht die Spezi-

alreserve der Verkehrssparten 25% des Jahresumsatzes der abgeltungsberechtigten Verkehrssparten oder beträgt sie 12 Mio. Franken, so steht der Gewinn dem Unternehmen zur freien Verfügung.

Das **Bestellverfahren RPV** orientiert sich am Fahrplanverfahren und wird dementsprechend i.d.R. alle zwei Jahre durchgeführt. Die Federführung beim Bestellverfahren RPV liegt bei den Kantonen, wobei ein Kanton die Koordination übernimmt. Die Angebotsvereinbarungen werden für zwei Jahre abgeschlossen, wobei gewisse Kantone aufgrund des jährlichen Budgetprozesses die finanziellen Mittel unter Vorbehalt zusichern. Aufgrund von Vorgaben des Bundes und der Kantone zum Fahrplan und den voraussichtlich zur Verfügung stehenden Mitteln erstellen die TU Offerten pro Linie. Bis zur Betriebsaufnahme zum Fahrplanwechsel dauert der Prozess rund 1.5 Jahre (Abbildung 34). In der Verordnung über die Abgeltung des regionalen Personenverkehrs (ARPV) vom 11. November 2009 sind Einzelheiten zum Bestellverfahren RPV festgelegt.

Abbildung 34: Ablauf Bestellverfahren RPV



TU: Transportunternehmen

Grafik INFRAS.

Seit 2018 werden die RPV-Mittel des Bundes mit einem vierjährigen Verpflichtungskredit (VK) festgelegt (Umwandlung des Zahlungsrahmens). Der Kredit dient vorwiegend der Finanzierung der derzeitigen Leistungen. Die Höhe des Verpflichtungskredits orientiert sich daher an einer

Fortschreibung der bisherigen Mittel des letzten Budgetjahres unter Berücksichtigung wesentlicher Änderungen. Für den **RPV VK des Bundes für die Jahre 2022–2025** heisst dies, dass die geplanten Abgeltungen für das Jahr 2021 Absprungbasis ist. Wesentliche Änderungen wurden auf Basis einer Umfrage bei ausgewählten TU zu Projekten, einer allgemeinen Entwicklung der Abgeltungen ohne Projekte und einer Teuerungsprognose geschätzt. Der Mehraufwand für die Umstellung auf alternativ angetriebene Busse im RPV wurde nicht direkt berücksichtigt. Nach Rückmeldung des BAV wird davon ausgegangen, dass die beantragten zusätzlichen Mittel (ohne Projekte) von rund 10–11 Mio. Franken p.a. auch für die Umstellung auf fossilfreie, energieeffiziente Busse ausreichen sollten, da von einer schrittweisen Umsetzung ausgegangen wird. Eine mögliche Erweiterung des Geltungsbereichs soll geprüft werden. Gemäss Auskunft des BAV ist damit jedoch keine Erweiterung des Geltungsbereichs um den Ortsverkehr gemeint.

Im Rahmen der Vernehmlassung zur geplanten **Reform im RPV** schlug der Bund die zwei Varianten «Optimierung» und «Teilentflechtung» vor (UVEK 2019). Aufgrund der Ergebnisse im Rahmen der Vernehmlassung, hat sich der Bund entschieden, die Variante «Optimierung» weiterzuverfolgen (BAV 2020c). In dieser sollen die finanziellen Absichten des Bundes für weitere vier Jahre zusätzlich zum vierjährigen Verpflichtungskredit festgelegt und die Kriterien für die Mitfinanzierung präzisiert werden. Zielvereinbarungen sollen gestärkt und ein schweizweites Benchmarking eingeführt werden sowie neue Finanzierungsmöglichkeiten des Bundes für Innovationsförderung die Weiterentwicklung innerhalb der Branche stärken. Die Variante «Teilentflechtung», bei der der Bund auf eine Mitbestellung der Buslinien im RPV verzichtet bzw. die Kompetenz den Kantonen übertragen hätte und einen indexierten Pauschalbeitrag zur Finanzierung direkt an die Kantone gezahlt hätte, wird verzichtet. Der Bundesrat hat das UVEK beauftragt, bis im März 2021 die Botschaft auszuarbeiten.

Gestützt auf Art. 33 Abs. PBG und Art. 24 bis 26 VPB können Bund und Kantone mit Transportunternehmen in mehrjährigen **Zielvereinbarungen** mittel- oder langfristige Leistungsziele in Bezug auf Qualität, Quantität, Erlösen und Kosten festlegen sowie ein Bonus-Malus-System vorsehen (vgl. auch BAV 2016). Zielvereinbarungen können sich auf einzelne oder alle Linien des TU beziehen und werden mindestens für zwei Jahre abgeschlossen. Das Instrument der Zielvereinbarung soll gestärkt werden (UVEK 2019). Bei den qualitativen Zielen bildet das **Qualitätsmesssystem RPV (QMS)** und kantonale **Kundenzufriedenheitsbefragungen** die Basis. Im QMS RPV sind 15 bewertungsrelevante Kriterien definiert. Diese berücksichtigen die von den ÖV-Nutzenden wahrgenommene Qualität betreffend Kundeninformation (Fahrzeug, Haltestelle), Funktionsfähigkeit der Einrichtungen, Ordnung, Sauberkeit, Schadensfreiheit, Kompetenz und Verhalten des Fahrpersonals. Der Aspekt der Umweltfreundlichkeit eines Fahrzeugs wird daher nicht erfasst und bewertet. Inwiefern Umweltziele bei der Definition der Angebote

und der Abgeltungen berücksichtigt werden, ist in den Kantonen daher sehr verschieden (vgl. Abschnitt 5.2.3).

Angebote des **RPV ohne Erschliessungsfunktion und Ortsverkehr** sind von Bundesleistungen ausgeschlossen (Art. 28 Abs. 2 PBG); diese werden durch Kantone und Gemeinden bestellt und finanziert. Die Bestellung und Finanzierung von RPV ohne Erschliessungsfunktion und Ortsverkehr ist jeweils in den kantonalen ÖV-Gesetzen geregelt. Grundsätzlich orientieren sich die Bestellverfahren am Fahrplanverfahren. Ohne kantonale Regelung gelten subsidiär die Regeln des Bundes zum Bestellverfahren und zu Zielvereinbarungen auch bei den von den Kantonen alleine bestellten Verkehrsangeboten (UVEK 2019). Die Kostenteilung zwischen Kanton und Gemeinden ist sehr unterschiedlich geregelt. Es gibt verschiedene Modelle:

- Der Kanton bestellt und finanziert das Grundversorgungsangebot (ohne Beiträge der Gemeinden), wobei die Gemeinden in die Angebotsplanung (ÖV-Programm) eingebunden sind.
- Kanton und Gemeinden teilen sich die Kosten des RPV und Ortsverkehrs gemäss eines Kostenteilers / -schlüssels oder nach einem definierten pauschalen Anteil (z.B. 50%), der vorab definiert ist.
- Der Kanton bestellt das Angebot im RPV, die Gemeinden das Angebot im Ortsverkehr, wobei gegenseitige Kostenbeteiligungen möglich sind.

Tabelle 13 zeigt die Höhe der öffentlichen Mittel der Finanzierung im öffentlichen Verkehr und deren Aufteilung nach Körperschaften (Litra 2019). Den Kantonen kommt als Besteller der Angebote im RPV und Ortsverkehr eine zentrale Rolle zu.

Tabelle 13: Finanzierung öffentlicher Verkehr durch die öffentliche Hand

Marktbereich	Körperschaft	Finanzielle Mittel (Mio. CHF) ¹		Anteil %
Regionalverkehr	Bund	969	969	26%
	Kantone	977	1'940	51%
Ortsverkehr	Kantone	963		
	Gemeinden	855	855	23%

¹ Stand: 2016 (Gemeinden), 2017 (Kantone), 2018 (Bund).

Tabelle INFRAS. Quelle: Litra 2019, S. 31.

Betriebsmittelbeschaffung durch die KTU im RPV

Die **Folgekosten von Investitionen im RPV** können in die Planrechnung einer Offerte für ein Verkehrsangebot aufgenommen werden, wenn Bund und Kantone der Aufnahme vor der Investition zugestimmt haben (Art. 19 Abs. 1 PBG). Die Genehmigung ist für Rollmaterial

(Schiene), Werkstätten und Eisenbahn-Depots (der Sparte RPV) sowie Seilbahnen (RPV) zwingend. Für weitere Betriebsmittel wie Busse und Busdepots war eine explizite Genehmigung bisher nicht zwingend, sondern wurde im Einzelfall festgelegt. Im Rahmen des Bestellverfahrens wird dies auf Basis des Investitionsplans geprüft (BAV 2017a). Gemäss Rückmeldung des BAV ist neu vorgesehen, dass für Strassenfahrzeuge mit alternativen Antrieben generell eine ARPV-Genehmigung verlangt wird, damit die Kosten in die RPV-Offerten aufgenommen werden dürfen. Der BAV-Leitfaden wird entsprechend angepasst werden.

Für die Finanzierung von Investitionen im RPV kann der Bund im Rahmen der bewilligten Kredite eine Bundesgarantie gewähren (Art. 34 PBG). Die **Solidarbürgschaft des Bundes** wird auf Gesuch der KTU gewährt, sofern für die Investition eine ARPV-Genehmigung vorliegt und eine wesentliche Zinseinsparung erzielt wird (BAV 2017a).³⁴ Der entsprechende Rahmenkredit läuft Ende 2020 aus und soll aufgrund der bisherigen Erfahrungen erneuert werden (IWSB und HSLU 2018). Der Bundesrat hat im Juni 2020 beschlossen, den auslaufenden Bürgschaftsrahmenkredit um zehn Jahre zu verlängern (BAV 2020b).

Die Beschaffung der Fahrzeuge erfolgt durch die Transportunternehmen. TU, die Abgeltungen für die Erfüllung öffentlicher Aufgaben (im vorliegenden Fall Personentransporte im öffentlichen Verkehr) erhalten, unterliegen dem **öffentlichen Beschaffungsrecht** (vgl. Exkurs).

Exkurs: Öffentliches Beschaffungsrecht

Grundlage des öffentlichen Beschaffungsrechts in der Schweiz bildet das Übereinkommen über das öffentliche Beschaffungswesen (World Trade Organization – Government Procurement Agreement, WTO-GPA).³⁵ Die Schweiz hat mit der EU ein Abkommen über bestimmte Aspekte des öffentlichen Beschaffungswesens im Jahr 1999 abgeschlossen.³⁶

Rechtliche Grundlage des Bundes ist das Bundesgesetz über das öffentliche Beschaffungswesen (BöB) vom 16. Dezember 1994.³⁷ Das revidierte Bundesgesetz über das öffentliche Beschaffungswesen vom 21. Juni 2019 tritt am 01.01.2021 in Kraft. Das BöB regelt das Verfahren zur Vergabe von öffentlichen Liefer-, Dienstleistungs- und Bauaufträgen auf Bundesebene. Es legt aktuell fest, dass das wirtschaftlich günstigste Angebot den Zuschlag erhält. Neu sollen leistungsbezogene Zuschlagskriterien mehr Bedeutung erhalten und der Qualitäts- gegenüber dem Preiswettbewerb und die Nachhaltigkeit gestärkt werden.

³⁴ Für die Beschaffung von Rollmaterial für den Schienenverkehr durch die SBB AG werden auch Kredite durch Eurofima gewährt.

³⁵ SR 0.632.231.422.

³⁶ SR 0.172.052.68.

³⁷ SR 172.056.1. Das revidierte Bundesgesetz über das öffentliche Beschaffungswesen vom 21. Juni 2019 tritt am 01.01.2021 in Kraft.

Auf kantonalen Ebene werden die Vergaberegeln der internationalen Abkommen in der interkantonalen Vereinbarung über das öffentliche Beschaffungswesen (IVöB) vom 15. März 2001 festgelegt. Die IVöB als Rahmenordnung wurde im Jahr 2019 ebenfalls revidiert und dem revidierten Bundesgesetz abgestimmt.³⁸ Auch kantonal soll die öffentliche Beschaffung qualitätsorientierter erfolgen. Nachhaltigkeit ist ein mögliches Zuschlagskriterium. Die Kantone erlassen Ausführungsbestimmungen.

Mit dem revidierten öffentlichen Beschaffungsrecht hat der Aspekt der Nachhaltigkeit (Wirtschaftlichkeit – Ökologie – Soziales) an Bedeutung gewonnen. Die TU können entsprechende Zuschlagskriterien und deren Gewichtung im Rahmen ihrer Ausschreibungen für ihre jeweilige Beschaffung von Fahrzeugen festlegen. Beschaffungsrechtliche Vorgaben wie sie beispielsweise die EU Clean Vehicle Directive betreffend der Beschaffung von Bussen vorsieht (vgl. Kap. 5.3.1), gibt es in der Schweiz unserer Kenntnis nach nicht.

Förderung von Innovationen

Das BAV unterstützt die Forschung und Innovation im Zusammenhang mit dem ÖV, dem Güterverkehr und der Bahninfrastruktur mit rund 10 bis 15 Mio. Franken pro Jahr, um deren Systeme noch leistungsfähiger zu machen. Das BAV plant im Rahmen des RPV-Verpflichtungskredits für die Jahre 2022–2025 jährlich Mittel von rund 5 Mio. Franken für die Förderungen von Innovationen für den ÖV bereitzustellen (BAV 2020a).

Der Bund kann zur Förderung neuartiger Lösungen an die Beschaffung von Fahrzeugen und an die Erstellung von Anlagen und Einrichtungen Finanzhilfen (Beiträge, unverzinsliche Darlehen) gewähren (Art. 31 Abs. 2 PBG). Im Vordergrund stehen dabei Kostenreduktionen und der Mehrwert für die Kunden (BAV 2017b). Innovationen werden hierbei, gestützt auf Art. 2 Bst. b des Bundesgesetzes über die Förderung der Forschung und der Innovation (FIFG) vom 14. Dezember 2012, als die Entwicklung neuer Produkte, Verfahren, Prozesse und Dienstleistungen für Wirtschaft und Gesellschaft durch Forschung und die Verwertung ihrer Resultate definiert (BAV 2017b). Massnahmen zur Förderung von Pilotversuchen mit bestehenden Produkten und der Marktdurchdringung zur Erzielung von Skaleneffekten und Erhöhung der Marktakzeptanz sind gemäss dieser Definition ausgeschlossen.

Weitere finanzielle Fördermassnahmen sind in Kap. 5.2.2 zusammengefasst.

³⁸ Totalrevision der Interkantonalen Vereinbarung über das öffentliche Beschaffungswesen (IVöB) vom 15. November 2019, Musterbotschaft, Version 1.0 vom 16. Januar 2020. Der Ratifizierungsprozess in den Kantonen ist gestartet. Die revidierte IVöB tritt in Kraft sobald ihr zwei Kantone beigetreten sind.

Nationale Steuerbefreiungen und -erleichterungen für KTU

In der Sparte Verkehr sind die konzessionierten Tätigkeiten, wenn diese bestellt und abgeboten werden, **von der direkten Bundessteuer befreit** (Art. 56 Bst. d DBG³⁹).

Die Mineralölsteuer wird für Treibstoffe, die durch die vom Bund konzessionierten TU verwendet werden, ganz oder teilweise rückerstattet (Art. 18 Abs 1^{bis} MinÖG). Der Bundesrat hat festgelegt, dass die **Mineralölsteuerrückerstattung** für KTU aus ökologischen Gründen differenziert wird (Art. 49 MinÖV). Die Verordnung des EFD über die Steuerbegünstigungen bei der Mineralölsteuer vom 22. November 2013 legt die Details fest (Tabelle 14). Die KTU erhielten durchschnittlich Mineralölsteuerrückerstattungen von insgesamt rund 70 Mio. Franken pro Jahr. Rund ein Drittel davon entfallen auf die PostAuto AG.⁴⁰

Tabelle 14: Rückerstattung Mineralölsteuer für Fahrten mit Strassenfahrzeugen zum Zweck der Personenbeförderung mit einer Konzession des Bundes

Fahrzeug	Rückerstattung
Strassenfahrzeuge ohne Partikelfilter oder gleichwertiges System	Mineralölsteuerzuschlag (30 Rp./Liter Diesel)
Strassenfahrzeuge mit Partikelfilter oder gleichwertigem System sowie EURO-IV-, EURO-V- und EEV-Fahrzeuge ohne Partikelfilter oder gleichwertiges System, die gemäss Fahrzeugausweis bis zum 31. Dezember 2007 erstmals zum Verkehr zugelassen wurden	Mineralölsteuerzuschlag und teilweise Mineralölsteuer (59 Rp./Liter Diesel)

EEV: Enhanced environmentally friendly vehicle, KTU: Konzessionierte Transportunternehmen

Tabelle INFRAS. Quelle: Verordnung des EFD über die Steuerbegünstigungen bei der Mineralölsteuer vom 22. November 2013 (Stand am 1. Dezember 2019), SR 641.612

Pauschale Mineralölsteuerrückerstattung begünstigen die Beschaffung und Nutzung von Dieselfahrzeugen und setzen daher einen Fehlanreiz im Hinblick auf die Förderung umweltschonender Fahrzeuge. Im Rahmen der Totalrevision des CO₂-Gesetzes wird eine Anpassung der Mineralölsteuerrückerstattung für KTU diskutiert (Änderung Mineralölsteuergesetz). Gemäss der zuletzt publizierten Fahne hat sich die Kommission für Umwelt, Raumplanung und Energie des Ständerats (UREK-S) im August 2020 für eine Abschaffung der Rückerstattung ab dem Jahr 2026 für Fahrzeuge der KTU im Ortsverkehr und ab 2030 für alle im konzessionierten Verkehr eingesetzten Fahrzeuge ausgesprochen.⁴¹ Falls die vom Bund durch den Wegfall der Rückerstattung der Mineralölsteuer eingesparten Mittel zweckgebunden zur Förderung CO₂-neutraler, erneuerbarer Antriebstechnologien im strassengebundenen öffentlichen Verkehr verwendet würden, würde ein neues Förderinstrument entstehen.

³⁹ SR 642.11.

⁴⁰ Interpellation Grossen vom 22.03.2019 «Rückerstattung der Mineralölsteuer. Ist das Zukunftsweisend?», 19.3375.

⁴¹ Totalrevision des CO₂-Gesetzes nach 2020 (17.071n), Fahne 2020 III S, <https://www.parlament.ch/centers/e-parl/curia/2017/20170071/S4%20D.pdf>.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass die Abschaffung der Mineralölsteuerrückerstattung zur Beseitigung dieses Fehlanreizes zu einer Reduktion der Mehrkosten fossilfreier Busse gegenüber den Dieseln (Referenz) führt, d.h. fossilfreie Busse sind weniger teuer im Vergleich zur Referenz und werden attraktiver. Gleichzeitig steigen dadurch – unter der Annahme gleichbleibender Tarife und damit Einnahmen der Transportunternehmen – aber auch die ungedeckten Kosten der Betreiber und damit der Abgeltungsbedarf (Basisseffekt zu Beginn). Die Mehreinnahmen des Bundes aus der Mineralölsteuer sind grösstenteils zweckgebunden.

KTU als öffentliche Unternehmen und Eignerziele

Konzessionierte Strassentransportunternehmen sind sowohl privatwirtschaftliche als auch öffentliche Unternehmen, die ganz oder mehrheitlich in der öffentlichen Hand sind. Zudem können Transportunternehmen Teil der Verwaltung sein (z.B. wie die Verkehrsbetriebe Zürich). Bund, Kantone und Gemeinden als Eigner von Strassentransportunternehmen haben die Möglichkeit, strategische Ziele für das jeweilige Unternehmen festzulegen und auch entsprechende Vorgaben zu machen.

Die Festlegung von Vorgaben sowohl durch den Gewährleister (Besteller von Leistungen) als auch dem Eigner der Unternehmen kann zu Zielkonflikten und Fehlanreizen führen. Beispielweise können Vorgaben zur maximalen Verschuldung eines Transportunternehmens Investitionsentscheidungen beeinflussen. Im Idealfall sind diese daher aufeinander abgestimmt.

5.2.2. Nationale Fördermassnahmen und weitere Finanzierungsinstrumente des Bundes

Ergänzend zur ordentlichen Finanzierung im RPV und Ortsverkehr wird die Beschaffung von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur durch zusätzliche nationale Massnahmen gefördert.

Massnahmen des Bundes

Gestützt auf Art. 49 Abs. 1 Energiegesetz vom 26. Juni 1998⁴² fördert das Bundesamt für Energie (BFE) mit dem **Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm (P+D+L-Programm)** die marktnahe Entwicklung von innovativen Technologien und Lösungen zur sparsamen und effizienten Energieverwendung bzw. Nutzung erneuerbarer Energien. Das P+D+L-Programm ermöglicht die Erprobung und Demonstration neuer Technologien und Lösungen, um Aufschluss über die Machbarkeit, technische Funktionstüchtigkeit, Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit zu erhalten (BFE 2016, BFE 2019). Das in den Jahren 2015 bis 2017 für die Förderung von P+D+L-Projekten verfügbare Budget von jährlich CHF 30 bis 35 Mio. konnte nicht ausgeschöpft werden. Im Jahr 2018 stehen dem Bundesamt für Energie (BFE) CHF 24 Mio. für die

⁴² SR 730.0.

Förderung von Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekten (P+D+L-Projekte) zur Verfügung (INFRAS 2018). Es wird davon ausgegangen, dass Projekte zur (beschleunigten) Markteinführung innovativer Technologien beigetragen haben dürften.

Tabelle 15: Förderung von Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekten (BFE)

Förderprogramm	Förderung von Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekten
Träger	Bundesamt für Energie
Laufzeit	seit 2013, Anträge sind immer möglich
Zweck und Ziele	Förderung von Entwicklung und Erprobung von innovativen Energietechnologien zur sparsamen und effizienten Energieverwendung oder der Nutzung erneuerbarer Energien
Gegenstand	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pilotanlagen und -projekte, die der technischen Erprobung von Energiesystemen, -methoden oder -konzepten dienen, und in einem Massstab realisiert werden, der die Bestimmung wissenschaftlicher, technischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Daten erlaubt ▪ Demonstrationsanlagen und -projekte, die dem Nachweis der Funktionstüchtigkeit im marktnahen Umfeld dienen, und eine umfassende technische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Beurteilung im Hinblick auf die effektive Markteinführung von innovativen Energietechnologien oder -lösungen ermöglichen. ▪ Demonstrationsanlagen und -projekte können vom BFE als Leuchtturmprojekte anerkannt werden, wenn diese der Bekanntmachung von neuen, wegweisenden Konzepten und Technologien dienen und den Energiedialog in der breiten Bevölkerung unterstützen.
Empfänger	privatwirtschaftliche und öffentliche Unternehmen, Wirtschafts- und Branchenverbände, Hochschulen, Forschungsanstalten, Nichtregierungsorganisationen, die öffentliche Hand (Kantone, Städte und Gemeinden) oder Arbeitsgemeinschaften sein, die sich aus mehreren der genannten Organisationen bzw. Institutionen zusammensetzen und die sich entweder an der Durchführung und/oder an der Finanzierung des Projekts beteiligen
Art und Umfang	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Finanzhilfen bei Pilot- und Demonstrationsprojekten i.d.R. 40% der anrechenbaren Projektkosten (in Ausnahmefällen 60%) ▪ Anrechenbare Kosten: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mehrkosten des Projektes gegenüber herkömmlichen, am Markt erhältlichen Technologien ▪ Investitionskosten (Honorare, Material inkl. Messgeräte, Laboreinrichtungen und technisches Verbrauchsmaterial) als auch die Betriebskosten über die Lebensdauer der Anlagen
Verfahren	Förderung auf Antrag (bottom-up-Ansatz) oder Aufrufe zur Einreichung von Projekten durch das BFE (top-down-Ansatz)
Förderrichtlinie und weitere Unterlagen	BFE 2019: Vollzugsweisung zur Einreichung und Evaluation von Gesuchen um Finanzhilfe für Energieforschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekte, Version 17.12.2019.

Tabelle INFRAS.

Der Bund fördert **Forschung und Entwicklung sowie Innovationen im ÖV**. Innovationen im regionalen Personenverkehr können aus dem RPV-Kredit des Bundes gefördert werden (vgl. Kap.

5.2.1). Im Rahmen der Energiestrategie 2050 des Bundes hat das BAV das Programm «Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)» lanciert (BAV 2017c). Das Programm richtet sich an alle Transportunternehmen im ÖV. Schwerpunktmässig werden

- Projekte der angewandten Forschung,
- die Sammlung, Analyse und der Austausch von Daten sowie
- die Entwicklung von Prototypen und Pilot-Anlagen in der Versuchsphase unterstützt.

Gemäss Auskunft des BAV wurden bisher alle Gesuche um Förderung von E-Bussen durch F&E&I-Mittel aufgrund mangelndem Innovationscharakter abgelehnt. Beiträge an die Entwicklung von Unternehmensstrategien zur Umsetzung der Energieziele wurden hingegen finanziert. Dieses Instrument ist im Zusammenhang mit der Beschaffung von fossilfreien Bussen daher nicht relevant sofern es sich nicht um neuartige technische Entwicklungen handelt. Eine finanzielle Förderung der Marktentwicklung – wie dies beispielsweise mit den deutschen nationalen Förderprogrammen beabsichtigt wird (vgl. 5.3.2) – ist unter diesen Bedingungen auf nationaler Ebene nicht vorgesehen.

Im Rahmen des **Programms des Agglomerationsverkehrs** des Bundesamts für Raumentwicklung (ARE) können aus dem Nationalstrassen- und (NAF) infrastrukturseitige Massnahmen durch den Bund mitfinanziert werden. Im Busbereich sind dies insbesondere Oberleitungen für Trolleybusse. Gemäss Auskunft des ARE wird Ladeinfrastruktur für den Agglomerationsverkehr durch den Bund ebenfalls mitfinanziert, d.h. Mitfinanzierungen sind beispielsweise für Ladestationen in Busdepots oder an Stationen möglich. Darüber hinaus werden gestützt auf Art. 17a Abs. 2 bis MinVG auch Beiträge an entsprechende Mehrkosten des Rollmaterials ausgerichtet, falls erhebliche Infrastrukturkosten eingespart werden. Grundsätzlich mitfinanzierbar sind die Mehrkosten neuer E-Bus-Generationen, welche oberleitungsfrei fahren können (Depot- oder Gelegenheitslader), einschliesslich der nötigen Anpassungen an den Haltestellen (Ladestationen) und andere nötige elektrischen Installationen. Die eingesparten Investitionskosten im Vergleich zu den Investitionskosten herkömmlicher Trolleybusse müssen nachgewiesen werden (ARE 2020a). Zur Mitfinanzierung von Rollmaterial sind folgende Nachweise zu erbringen: Eingesparte Investitionskosten wegen Verzicht oder Teilverzicht auf klassische Trolleybusinfrastrukturen (Oberleitungen); Netzsynergien mit bereits bestehendem Trolleynetzsystemen (z.B. Linienerweiterung zu ESP oder Quartieren) mit grossem Nachfragepotenzial; substantielle Mehrkosten der Erneuerung der Flotte gegenüber klassischen Trolleybussen (wobei diese Mehrkosten deutlich geringer sein müssen als die Investitionskosten der klassischen Elektrifizierung).

Der Beitragssatz des Bundes ergibt sich aus dem Kosten-Nutzen-Verhältnis des jeweiligen Agglomerationsprogrammes und liegt zwischen 30 und 50 Prozent. Im Durchschnitt werden rund 35 bis 40% der anrechenbaren Kosten durch den Bund mitfinanziert. Das UVEK schliesst

Leistungsvereinbarungen mit den Kantonen und regionalen Körperschaften ab. Die vierte Generation der Agglomerationsprogramme werden derzeit erarbeitet und sind bis Mitte Juni 2021 dem Bund zur Prüfung einzureichen.

Der Prozess von Vorbereitung bis zum Abschluss einer Leistungsvereinbarung und deren Umsetzung folgt i.d.R. einem Vierjahreszyklus. Das Agglomerationsprogramm wird durch die jeweilige Trägerschaft (Gebietskörperschaften: Kantone, regionale Körperschaften sowie Gemeinden) erarbeitet. Die KTU sind insofern nicht direkt verantwortlich. Den Kantonen und Gemeinden als Besteller von RPV und Ortsverkehr kommt eine zentrale Rolle zu.

CO₂-Kompensationspflicht der Treibstoffimporteure gemäss CO₂-Gesetz

Seit 2013 gilt in der Schweiz eine CO₂-Kompensationspflicht für Treibstoffimporteure gemäss CO₂-Gesetz. Für die Erfüllung der Kompensationspflicht stehen den Kompensationspflichtigen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Reduktionsleistungen aus Projekten und Programmen zur Emissionsverminderung im Inland (CO₂-Kompensation) können bescheinigt und für die Kompensation von Emissionen genutzt werden. Zentral ist dabei der Nachweis, dass die Reduktionen zusätzlich sind und ohne Projekt bzw. Programm nicht eingetreten wären.

Für inländische Projekte zur Emissionsverminderung (Kompensationsprojekte) kann das Bundesamt für Umwelt (BAFU) handelbare Bescheinigungen ausstellen. Kompensationsprojekte müssen vorgängig registriert und die jährlichen Emissionsminderungen nachgewiesen werden (jährliches Monitoring). Der Bund (BAFU und BFE) kontrolliert, ob die CO₂-Reduktion zusätzlich zur Referenzentwicklung⁴³ ist und ob die Einsparung korrekt quantifiziert wurde.

Es wird davon ausgegangen, dass die Beschaffungen ohne Erlöse aus den Bescheinigungen nicht wirtschaftlich sind. Die Bescheinigungen führen dazu, dass die Beschaffung wirtschaftlich attraktiver ist. Bescheinigt werden nur freiwillige Massnahmen, die über gesetzliche Anforderungen hinausgehen und nicht bereits anderweitig gefördert werden (BAFU 2020), d.h. diese müssen zusätzlich sein und in diesem Sinne wird nur der ökologische Mehrwert (Reduktion CO₂) bescheinigt. Das Instrument orientiert sich daher nicht an den Kosten, um diese Reduktion zu erreichen, sondern allein an der reduzierten Menge CO₂.

Die Stiftung myclimate als gemeinnützige Organisation entwickelt Klimaschutzprojekte u.a. für den Verpflichtungsmarkt in der Schweiz. Myclimate hat bis Ende 2018 rund 100 Mio. Franken für Klimaschutzprojekte aktivieren können und unterstützt damit die Stiftung Klimaschutz und CO₂-Kompensation KLIK bei der Erfüllung ihrer gesetzlichen Pflicht. Im Rahmen des **Kompensationsprojekts «Elektro- und Hybridbusse»** wird die Anschaffung und der Einsatz alterna-

⁴³ Das Referenzszenario geht vom Einsatz fossiler Busse gemäss Referenzflotte aus und wird jährlich überprüft und entsprechend der Marktdurchdringung mit Elektro- und Hybridbussen angepasst. Die methodischen Ansätze betreffend Referenzentwicklung sind in der Projektbeschreibung erläutert (myclimate 2020).

tiver Antriebstechnologien in der Schweiz finanziell unterstützt (Tabelle 16). Das Kompensationsprojekt ist beim Bundesamt für Umwelt (BAFU) registriert und wurde im Jahr 2019 revalidiert. Finanziert wird das Projekt durch den Verkauf von Bescheinigungen, d.h. es fließen keine öffentlichen Mittel. Der Förderbetrag von 112 CHF/tCO₂ wurde mit der Stiftung Klimaschutz und CO₂-Kompensation KliK ausgehandelt. Ab dem Jahr 2021 soll der Förderbetrag für E-Busse auf 200 CHF/tCO₂ deutlich erhöht werden.

Das Projekt umfasste im Jahr 2018 sieben Vorhaben (myclimate 2019c, vgl. Tabelle 16):

- Aare Seeland Mobil AG (AAS) mit 3 Hybridbussen
- Bus du Soleil S.A. mit 4 Hybridbussen
- Eurobus Gruppe mit 11 Hybridbussen
- Regionale Verkehrsbetriebe Baden-Wettingen RVBW AG mit 3 Hybridbussen
- Verkehrsbetriebe Luzern AG (VBL) mit 3 Hybridbussen
- Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) mit 19 Hybridbussen
- Transports Publics Genevois (TPG) mit 12 Elektro-Bussen

Inzwischen sind weitere Vorhaben hinzugekommen. Die VBZ haben den Vertrag vorzeitig per Ende 2019 beendet, um die Einsparung der Treibhausgase bei sich bzw. der Stadt Zürich ausweisen bzw. anrechnen zu können.

Tabelle 16: CO₂-Kompensationspflicht der Treibstoffimporteure gemäss CO₂-Gesetz

Förderprogramm	Kompensationsprojekt «Elektro- und Hybridbusse»
Träger	Stiftung Klimaschutz und CO ₂ -Kompensation (KliK) / Stiftung myclimate
Laufzeit	seit 2013/2014 (Revalidierung im 2019)
Zweck und Ziele	Minderung von Treibhausgasemissionen durch Energieeffizienzverbesserung im Personentransport (zur Erfüllung der Kompensationspflicht der Treibstoffimporteure)
Gegenstand	Förderung der Anschaffung und des Einsatzes von <ul style="list-style-type: none"> ▪ Hybrid- und Plug-in-Hybrid-Bussen inkl. Busse mit Range Extender ▪ Batterie-Elektrobusse mit Langsam- und Schnellladebatterien (Batterieaufladung via Ladestation oder durch Opportunitätsladung) ▪ Hybrid-Trolleybussen (auch Batterie-Trolleybusse genannt), welche ohne Oberleitungen mindestens 30km fahren können
Empfänger	Unternehmen mit Bussen, die in der Schweiz eingesetzt werden (KTU, private Busbetreiber)
Art und Umfang	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Jährliche Förderung auf Basis einer voraussichtlichen CO₂-Reduktion gemäss Anmeldeformular und einem Beitrag in Höhe von 112 CHF/tCO₂ über 10 Jahre (Förderbeitrag von insgesamt bis zu 80'000 CHF pro Bus), d.h. Hybridbusse ca. 2'000 CHF/Jahr bzw. Elektrobusse: 8'400 CHF/Jahr ▪ ab 01.01.2021: Förderbeitrag von 200 CHF/tCO₂ für Elektrobusse ▪ seit 01.01.2020 (befristet bis 31.12.2023) Vorauszahlung von 60'000 CHF, nach Abzahlung dieser Vorauszahlung jährliche Förderung (Kontingent von 100 Elektrobusen) ▪ Teilnahmebedingungen bzw. Aufnahmekriterien: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Das Vorhaben befindet sich nicht in einem von der CO₂-Abgabe befreiten Unternehmen.

- Erzielte Emissionsverminderungen werden nicht anderweitig geltend gemacht. (Das Vorhaben führt zu zusätzlicher CO₂-Reduktion.)
- Die durch die Vorhaben erzielten Emissionsverminderungen werden an die Programmträgerschaft übertragen (und können daher nicht von den TU geltend gemacht werden).
- Der Umsetzungsbeginn des Vorhabens ist zum Zeitpunkt der Einreichung des Anmeldeformulars noch nicht erfolgt
- Werden staatliche Finanzhilfen⁴⁴ beansprucht, müssen diese auf Vorhabenebene im Monitoringbericht ausgewiesen werden. Die Berechnung der Wirkungsaufteilung erfolgt durch die Programmleitung im Monitoringbericht gemäss Vorgabe BAFU. Sollten Finanzhilfen den Betrag von 370'000 CHF pro Batteriebus, 170'000 CHF pro Hybrid-Trolleybus bzw. 60'000 CHF pro Hybridbus überschreiten, gilt das Vorhaben als nicht zusätzlich.

Verfahren	Förderung auf Antrag mit Anmeldeformular
Förder- richtlinie und wei- tere Un- terlagen	<p>myclimate 2014: Projektbeschreibung, https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/klima-kop-bis-2016/0031_elektr-_undhybridbusse.pdf.download.pdf/0031_elektr-_undhybridbusse.pdf, abgerufen am 16.01.2020.</p> <p>myclimate 2019a: Förderprogramm Elektro- und Hybridbusse, Projektbeschreibung, https://www.myclimate.org, abgerufen am 16.01.2020.</p> <p>myclimate 2019b: Förderprogramm Elektro- und Hybridbusse, Anmeldeformular, https://www.myclimate.org, abgerufen am 16.01.2020.</p> <p>myclimate 2019c: Monitoringbericht von Projekten/Programmen zur Emissionsverminderung in der Schweiz, 0031 Elektro- und Hybridbusse, 01.01.2018 bis 31.12.2018, https://www.bafu.admin.ch, abgerufen am 16.01.2020.</p> <p>myclimate 2020: Förderprogramm Elektro- und Hybridbusse, Projektbeschreibung, vom 27. März 2020.</p>

Tabelle INFRAS.

Wird die Beschaffung von Bussen bereits durch andere Programme gefördert (z.B. Stadt Bern, Kap. 5.2.3), sind die Wirkungen aufzuteilen, wenn die anderen Förderer die erzielten Emissionsreduktionen geltend machen.⁴⁵ Ist eine Aufteilung nicht möglich, erfolgt keine Förderung über das Programm.

Legt man die aktuelle maximale Förderung von 80'000 CHF für einen E-Depotlader (Standardbus) zugrunde (Stand 2020), entspricht dieser Betrag kurzfristig einer Förderquote von rund 20% der Investitionsmehrkosten gegenüber dem Diesel-Referenzbus. Langfristig bis 2035 würde dieser Förderbetrag aufgrund der Reduktion der Anschaffungskosten einer Förderquote von bis zu rund 35% an den Investitionsmehrkosten bei Anschaffung entsprechen. Es ist davon auszugehen, dass die maximale Förderung pro Bus mit der geplanten Erhöhung des Förderbeitrags von 112 auf 200 CHF/tCO₂ ab dem Jahr 2021 entsprechend erhöht wird und die Förderquote dadurch fast verdoppelt wird.

⁴⁴ Finanzhilfen sind geldwerte Vorteile, die Empfängern ausserhalb der Bundesverwaltung gewährt werden, um die Erfüllung einer vom Empfänger gewählten Aufgabe zu fördern oder zu erhalten (Vgl. Kap. 5.1). Die ÖV-Bestellung ist gemäss Subventionsgesetz kein geldwerter Vorteil, sondern eine Abgeltung, da der Besteller die Aufgabe definiert.

⁴⁵ Mit «geltend gemacht werden» ist gemeint, dass die Reduktionsemissionen in einem nationalen Inventar abgebildet werden.

Klimastiftung Schweiz

Die Klimastiftung Schweiz unterstützt KMU unter bestimmten Voraussetzungen (Tabelle 17). KTU sind i.d.R. von den Förderungen im Bereich der Elektromobilität ausgeschlossen.

Tabelle 17: Klimastiftung Schweiz

Förderprogramm	Projektförderung der Klimastiftung Schweiz
Träger	Klimastiftung Schweiz (freiwillige, privatwirtschaftliche Initiative)
Laufzeit	seit 2009 (unbefristet)
Zweck und Ziele	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion Treibhausgasemissionen ▪ Verbesserung der Energieeffizienz ▪ Stärkung der Wirtschaftsstandorte Schweiz und Liechtenstein
Gegenstand	<p>Anschubfinanzierung für</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ CO₂-Reduktions- und Energieeffizienzsteigerungsmassnahmen (EFFI), im Bereich Mobilität und Verkehr («eMobility») Ersatz von Fahrzeugen mit fossilem Treibstoff (Benzin, Diesel oder Gas) mit rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen (Range Extender und Hybride einschliesslich Plug-in Hybride sind von der Förderung ausgeschlossen) ▪ Entwicklung innovativer, Klimaschutzrelevanter Produkte und Technologien
Empfänger	<p>KMU mit bis zu 250 Vollzeitangestellten über die gesamte Firmengruppe in der Schweiz und Liechtenstein</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ deren Unternehmenskapital sich zu max. 50% in den Händen grösserer Konzerne (inkl. Joint Venture) und/oder öffentlich rechtlicher Organisationen befindet ▪ nicht von der CO₂- und/oder KEV-Abgabe (kostendeckende Einspeisevergütung) befreit ▪ keine Immobiliengesellschaft, die den Erwerb, die Erschliessung, die Finanzierung, die Baurealisation, die Vermietung, das Halten und die Vermarktung einer oder mehrerer Immobilien für Drittunternehmen bezwecken und deren Projektanträge in Zusammenhang mit diesen geschäftlichen Aktivitäten stehen
Art und Umfang	<p>Festbetragsfinanzierung durch nicht rückzuzahlende Zuschüsse (Spenden) mit Mitteln der Partnerfirmen aus der Netto-Rückvergütung der CO₂-Lenkungsabgabe</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Freiwillige Zielvereinbarungen mit dem Bund zur Steigerung der Energieeffizienz: Übernahme von bis zu 50% des Jahresbeitrags, den KMU an eine der beiden Non-Profit-Agenturen Energie Agentur der Wirtschaft (EnAW) oder Cleantech Agentur Schweiz (act) entrichten ▪ Energiesparen im Betrieb: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 30 CHF/t CO₂ über die Lebensdauer der Einsparung (max. 10 Jahre) oder ▪ 10 CHF/MWh über die Lebensdauer der Einsparung (max. 10 Jahre) ▪ Falls die Massnahme wiederum zusätzlich Strom (z.B. Wärmepumpen) verbraucht, wird die Förderung um den Satz 5 CHF/MWh über die Lebensdauer der Einsparung (max. 10 Jahre) reduziert ▪ Innovative Lösungen: Unterstützung bei der Entwicklung von klimafreundlichen Produkten
Verfahren	Förderung auf Antrag, Antrag jederzeit möglich
Förderrichtlinie und weitere Unterlagen	<p>Klimastiftung Schweiz 2015: Klima schützen. KMU stärken. Broschüre, https://www.klimastiftung.ch/files/03_die-stiftung/03_jahresbericht-broschuere/02_broschuere/Broschuere2015_DE.pdf, 2015.</p> <p>Klimastiftung Schweiz 2017: Reglement Projektförderung, Version 006 vom 15. Mai 2017</p>

Tabelle INFRAS.

5.2.3. Kantonale Rahmenbedingungen und ausgewählte kommunale Fördermassnahmen

Im Folgenden werden für die Kantone die Rahmenbedingungen, Finanzierungen und Fördermöglichkeiten aufgezeigt. Tabelle 18 gibt einen Überblick der Kantone.

- Rund ein Drittel der Kantone hat aktuell eine Strategie für einen fossilfreien, energieeffizienten ÖV. In 2 Kantonen ist eine Strategie in Vorbereitung.
- In fast allen Kantonen können die Mehrkosten für fossilfreie, energieeffiziente Busse im Rahmen der ordentlichen ÖV-Finanzierung grundsätzlich finanziert werden bzw. wurden in einzelnen Projekten bereits mitfinanziert. Inwieweit hierfür die notwendigen finanziellen Mittel künftig zur Verfügung stehen, kann nicht beurteilt werden und war nicht Gegenstand der Studie. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die jeweilige finanzielle Situation in den Kantonen und Gemeinden sehr unterschiedlich ist. Vor dem Hintergrund der aktuellen Situation (Einnahmehausfälle aufgrund der Covid-Pandemie) und da keine langfristigen Prognosen zu den finanziellen Mitteln der öffentlichen Hand vorliegen, nehmen wir im Rahmen der Abschätzung des finanziellen Bedarfs (Kap. 6.2) an, dass keine zusätzlichen Mittel für die Flottenumstellungen gegenüber den heutigen Mitteln reserviert sind.
- Verschiedene Förderinstrumente bzw. -massnahmen auf nationaler Ebene spielten bei den im Folgenden aufgezeigten Beispielen für die Beschaffung und Förderung fossilfreier Busse eine Rolle:
 - CO₂-Kompensationspflicht der Treibstoffimporteure (Kompensationsprojekt «Hybrid- und Elektrobusse»)
 - Agglomerationsprogramm für Infrastruktur (v.a. Oberleitungen Trolleybusse, aber auch Ladestationen und weitere)
 - P-D-L-Programm, z.B. für Genf (TPG) und Zürich (VBZ)
- Kantonale Fördermassnahmen zusätzlich zur ordentlichen ÖV-Finanzierung gibt es im Kanton Bern. Aus dem kantonalen Förderprogramm können Ladeinfrastruktur für den öffentlichen Verkehr mitfinanziert werden. Die CO₂-Wirkung gehört dem Kanton Bern.
- In einzelnen Gemeinden sind Förderungen (v.a. der Ladeinfrastruktur) zusätzlich zur ordentlichen Finanzierung möglich. Hervorzuheben sind ewz (Gemeinden in Zürich und Graubünden) mit einem Förderprogramm zur Finanzierung von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur sowie ewb (Stadt Bern) mit der Förderung von Ladestationen.
- Finanzielle Förderungen aus europäischen Fördermassnahmen spielen praktisch keine Rolle.

Tabelle 18: Finanzielle Förderungen für einen fossilfreien ÖV (Stand 2019)

Kanton	Strategie o.ä.	Gesetzliche Grundlage	Finanzierung Mehrkosten aus ÖV-Budget grundsätzlich möglich	Kantonales Förderprogramm für ÖV	Fzg-Inv. (Abschr.)	Be-triebs-kosten	Lad-einfra-struktur
Aargau	nein (in Arbeit)	nein	ja	nein	x		x
Appenzell AI	nein	nein	ja	nein	x	x	
Appenzell AR	nein	nein	k.A.	nein		k.A.	
Bern	ja	ja	ja	ja*	x	x	x
Basel-Landschaft	ja	nein	ja	nein	x	x	x
Basel-Stadt	ja	ja	ja	nein	x	x	x
Freiburg	ja	ja	ja	nein		x	x
Genf	ja	ja	ja	nein	x	x	x
Glarus	nein	ja	ja	nein	x	x	k.A.
Graubünden	nein	nein	ja	nein	x	x	x
Jura	nein	nein	ja	nein	x	x	k.A.
Luzern	ja	nein	ja	nein	x	x	x
Neuchâtel	nein	nein	ja	nein	x	x	k.A.
Nidwalden	nein	nein	ja	nein	x	x	k.A.
Obwalden	nein	nein	ja	nein	x	x	k.A.
Schaffhausen	nein	nein	RPV: nein, OV: ja	nein	(x)**	(x)**	(x)**
Solothurn	nein	nein (in Arbeit)	ja	nein (in Arbeit)	x	x	k.A.
St. Gallen	ja	ja	ja	nein	x	x	x
Schwyz	nein	nein	ja	nein	x	x	
Thurgau	nein (geplant)	nein	nein	nein	x		x
Tessin	nein	nein	ja	nein	x	x	
Uri	nein	nein	ja	nein		k.A.	
Waadt	nein	nein	ja	nein	x	x	x
Wallis	nein	ja	ja	nein		x	
Zug	nein	nein	ja	nein	x		x
Zürich	ja	nein	ja	nein	x	x	x

OV: Ortsverkehr, RPV: regionaler Personenverkehr, Fzg-Inv.: Fahrzeuginvestitionen, Abschr.: Abschreibung

* für Ladestationen im ÖV, ** Finanzierung Stadt Schaffhausen.

Tabelle INFRAS. Quelle: Umfrage alternative / CO₂-neutrale Antriebe für Busse, eigene Recherchen.

Kanton Aargau

Das Gesetz über den öffentlichen Verkehr (ÖVG) vom 2. September 1975⁴⁶ sieht keine gesetzlichen Vorgaben oder Ziele betreffend den Einsatz emissionsarmer, energieeffizienter Fahrzeuge

⁴⁶ SAR 995.100.

vor. Die Beschaffung alternativ angetriebener Busse und entsprechender Lade-/Betankungsinfrastruktur wird aus dem ordentlichen ÖV-Budget finanziert. Gemäss Mehrjahresprogramm 2020 sind Investitionsmittel für die E-Mobilität und innovative Businfrastruktur eingeplant (BVU 2019). Es wird davon ausgegangen, dass sich die Fahrzeuginvestitionskosten in den nächsten Jahren den Dieselnäheren annähern.⁴⁷

Das kantonale Förderprogramm im Bereich Energie sieht keine spezifische Förderung im Bereich ÖV für die Fahrzeugbeschaffung und entsprechender Infrastruktur vor.⁴⁸ Eine Strategie für den Einsatz von Bussen mit alternativen Antrieben sei in Arbeit.⁴⁹ Gestützt auf § 12 des Energiegesetzes des Kantons Aargau (EnergieG) vom 17. Januar 2012⁵⁰ kann der Kanton zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Verbesserung der CO₂-Bilanz in der Mobilität eigenständige rechtliche Grundlagen erlassen.

Beispiel Regionale Verkehrsbetriebe Baden-Wettingen (RVBW) AG

Die RVBW erhielt für ihre Hybridbusse eine Mitfinanzierung aus dem Instrument CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure (Kompensationsprogramm «Hybrid- und Elektrobusse» von myclimate). Für den Testbetrieb mit elektrisch angetriebenen Bussen (Linien 8) erhält RVBW Beiträge des Kantons für die Ladeinfrastruktur. RVBW wird zudem für den Versuch auf Linie 5 voraussichtlich eine finanzielle Unterstützung des BFE im Rahmen des P+D+L-Programms erhalten (vgl. Kap. 5.2.2).

Beispiel PostAuto AG Raum Brugg

Der Pilotbetrieb im Raum Brugg mit Brennstoffzellenbussen der PostAuto AG wurde Ende 2016 beendet.⁵¹ Das Projekt wurde im Rahmen des EU Projekts «Clean Hydrogen in European Cities CHIC» unterstützt.⁵²

Kanton Appenzell Innerrhoden

Das kantonale Gesetz über den öffentlichen Verkehr (GöV)⁵³ vom 24. April 2016 sieht keine Ziele zum Schutz der Umwelt vor. In der Energiestrategie des Kanton Appenzell Innerrhoden von 2014 ist als Leitidee formuliert, im Bereich der Energieeffizienz und dem Energiesparen (Gebäude und Mobilität) weitergehende Anstrengungen unternommen werden und insbeson-

⁴⁷ BVU 2019: Mehrjahresprogramm öffentlicher Verkehr 2020 (MJP öV 2020), Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Abteilung Verkehr, Beschluss des Grossen Rates vom 3. Dezember 2019.

⁴⁸ BVU 2020: ENERGIE, energieberatungAargau, Förderprogramm, Departement Bau, Verkehr und Umwelt, Version 1. Januar 2020.

⁴⁹ KKdÖV Umfrage.

⁵⁰ SAR 773.200.

⁵¹ PAG 2017: Projekt beendet: Weit gefahren mit Wasserstoff, Medienmitteilung, PostAuto AG, 1. Februar 2017.

⁵² Müller et al. 2017: Clean Hydrogen in European Cities CHIC, Deliverable No. 5.3, Final Report, https://fuelcell-buses.eu/sites/default/files/documents/Final%20Report_CHIC_28022017_Final_Public.pdf, 28. Februar 2017.

⁵³ GS 740.300.

dere eine ökologische Mobilität zu fördern. Es wurde angekündigt, dass die bestehenden Förder- und Subventionssysteme überprüft werden müssen. Das Förderprogramm Energie 2017 sieht keine kantonale Förderung im Bereich Mobilität vor.⁵⁴

Kanton Appenzell Ausserrhoden

Das Gesetz über die Förderung des öffentlichen Verkehrs des Kantons Appenzell Ausserrhoden vom 28. April 1991⁵⁵ soll unter anderem die Voraussetzungen für eine umweltgerechte Verkehrspolitik schaffen. Das kantonale Energiekonzept 2017–2025 legt für den Schwerpunkt Mobilität fest, dass sich der Kanton für eine energieeffiziente Mobilität einsetzt, der Anteil an fossiler Energie für die Mobilität kontinuierlich gesenkt werden soll und gleichzeitig der Anteil von Elektromobilität, Langsamverkehr und ÖV zu erhöhen ist. Hierbei soll der Fokus insbesondere auf den Ausbau der Ladeinfrastruktur gelegt werden. Im Rahmen der kantonalen Energieförderung ist die Förderung der Elektromobilität für Busse im ÖV (z.B. Ladestationen) nicht vorgesehen. Grundsätzlich müsste die Finanzierung über das ordentliche ÖV-Budget laufen.

Kanton Bern

Das kantonale Gesetz über den öffentlichen Verkehr (ÖVG)⁵⁶ bezweckt u.a. die Verminderung der Umweltbelastungen und des Energieverbrauchs des gesamten Verkehrs (Art. 1 Abs. 2 ÖVG). Gestützt auf das ÖVG werden Abgeltungen für den Betrieb einschliesslich Versuchsbetriebe (Art. 4 Abs. 1 Bst. b) sowie Investitionen für die Durchführung von Umweltschutzmassnahmen (Art. 5 Abs. 1 Bst. d ÖVG) finanziert.

Gemäss Gesamtmobilitätsstrategie des Regierungsrats des Kantons Bern (2008) wird ein umweltschonender und energieeffizienter Einsatz des ÖV verfolgt. Der Kanton Bern als Besteller entwickelt das ÖV-System schrittweise weiter und unterstützt die Transportunternehmen punktuell zur Verbesserung der Energieeffizienz. Ein Anreizsystem zur Förderung von energieeffizienten Fahrzeugen im ÖV soll entwickelt werden (BVE 2015).⁵⁷ Eine Strategie mit dem Fokus auf die Mitfinanzierungsmöglichkeiten des Kantons ist in Bearbeitung.⁵⁸

Im Rahmen des kantonalen Förderprogramms «Erneuerbare Energien und Energieeffizienz» werden Investitionsbeiträge an Ladestationen für den ÖV gefördert (Tabelle 19).

⁵⁴ AI 2018: Förderprogramm im Bereich der Energieeffizienz und der erneuerbaren Energien, gültig ab 1. Januar 2017, April 2018.

⁵⁵ bGS 760.1.

⁵⁶ BSG 762.4.

⁵⁷ BVE 2015: Reduktion des Energieverbrauchs im Verkehr, Bericht 2015, Bau-, Verkehrs- und Energiedirektion des Kantons Bern, vom Regierungsrat verabschiedet am 25. März 2015.

⁵⁸ KKdöV-Umfrage.

Tabelle 19: Förderprogramm «Erneuerbare Energien und Energieeffizienz»

Förderprogramm	«Erneuerbare Energien und Energieeffizienz»: Ladeinfrastruktur Elektromobilität im öffentlichen Verkehr
Träger	Kanton Bern, Amt für Umwelt und Energie (AUE)
Laufzeit	ab 2019
Zweck und Ziele	Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz
Gegenstand	Ladestationen für Elektrobusse von öffentlichen Verkehrsbetrieben
Empfänger	<ul style="list-style-type: none"> ▪ öffentliche Verkehrsbetriebe ▪ Unternehmen, die von der CO₂-Abgabe befreit sind, sind nicht förderberechtigt. Für Gebäude und Anlagen, die ganz oder mehrheitlich im Eigentum des Bundes oder des Kantons stehen, werden keine Beiträge gewährt.
Art und Umfang	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 35% der anrechenbaren Investitionskosten einer Anlage, max. 100'000 CHF pro Ladestation und in Abhängigkeit der Gesamtsumme ▪ nicht anrechenbar sind Investitionen in zusätzliche bauliche Massnahmen zur Installation oder zum elektrischen Anschluss der Ladestation, sowie Kosten für Bewilligungen, Planung und Betrieb ▪ Die Wirkung der CO₂-Einsparung für die geförderte Massnahme der Beitragszusicherung gehört offiziell dem Kanton Bern. Die Wirkung kann nicht aufgeteilt oder anderen Organisationen abgetreten werden.
Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einreichen Beitragsgesuch mit Beilagen vor Baubeginn auf dem Online-Portal <ul style="list-style-type: none"> ▪ Projektbeschreibung (inkl. Situationsplan) ▪ Produktbeschreibung des Herstellers für die Ladestation ▪ Kostenzusammenstellung ▪ Ausführung Bauvorhaben <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausführungsbestätigung mit Rechnungskopie ▪ Foto der Anlage mit Signalisation und Kennzeichnung ▪ Nachweis der Energiequelle (Vertrag / Bestätigung EVU) ▪ Einreichen Auszahlungsgesuch
Förderrichtlinie und weitere Unterlagen	AUE 2019: Förderprogramm Kanton Bern, Erneuerbare Energien und Energieeffizienz, Leitfaden, Amt für Umwelt und Energie, gültig ab Juli 2019, https://www.vol.be.ch/vol/de/index/energie/energie/foerderprogramm_energie.assetref/dam/documents/BVE/Energiefoerderung/de/ae_ef_fp_leitfaden_2019_d.PDF

Tabelle INFRAS.

Beispiel Bernmobil und Ökofonds der Stadt Bern / ewb

Gemäss aktueller Eigentümerstrategie der Stadt Bern⁵⁹ soll Bernmobil bis 2025 den Verbrauch fossiler Energie für die Traktion bezogen auf die Transportleistung im Stadtnetz (in Pkm, Basisjahr: 2008, exkl. Regionallinien) um 30 Prozent sowie den Energieverbrauch um 20 Prozent (bezogen auf Pkm, Basisjahr: 2008) reduzieren. Der Anteil elektrifizierter Buslinien ist zu erhöhen, wofür die technisch-betriebliche Machbarkeit nachzuweisen und die Finanzierung durch den Besteller zu sichern ist. Langfristig (Zeithorizont: 2040) soll Bernmobil seine Fahrzeugflotte ausschliesslich mit Energie aus erneuerbaren Quellen betreiben (insbesondere auf den Hauptlinien der Kernagglomeration).

Energie Wasser Bern (ewb) unterstützt Projekte zur Steigerung der Energieeffizienz. Gemäss Art.6 des ewb-Reglements⁶⁰ trägt ewb dem Schutz der Umwelt und der Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen Rechnung. Die Eignerstrategie Energie Wasser Bern (ewb) vom 9. November 2016 hält fest, dass ewb in Abstimmung und gegebenenfalls in Kooperation mit der Stadt Bern die Einführung von Elektromobilitäts Optionen in unterschiedlichen Fahrzeugkategorien und Verkehrsarten mit geeigneten Angeboten und Dienstleistungen unterstützen kann. ewb bewirtschaftet den Ökofonds zur Förderung von Energieeffizienz und erneuerbaren Energien der Stadt Bern. Dieser finanziert sich durch einen zweckgebundenen Rückbehalt von mindestens 10% des jährlich durch ewb an die Stadt Bern auszuschüttenden Gewinns. Aus dem Ökofonds werden Projekte im Grossraum Bern gefördert (ewb 2019).⁶¹

Aus dem Ökofonds der Stadt Bern, durch Beiträge des Kantons und aus den Reserven von Bernmobil wurde 2016 die Beschaffung von 21 Hybrid-Bussen durch Bernmobil finanziell gefördert. Die Ausschreibung durch Bernmobil erfolgte technologieoffen, wobei elektrisch angetriebene Fahrzeuge nicht zugelassen wurden. Bei der Ausschreibung durch Bernmobil wurden die Zuschlagskriterien Wirtschaftlichkeit in Bezug auf Investitions- sowie Unterhaltskosten (50%), Nachhaltigkeit in Bezug auf Lärm und Schadstoff-Emissionen (20%), Lastenheft (16%), Kommerzielles (5%) und Fahrzeugtest (9%) berücksichtigt. Bei der Beurteilung der Investitionskosten wurden Beiträge Dritter (finanzielle Unterstützung von Kanton und Stadt Bern) bereits angerechnet.⁶² Aufgrund der Anrechnung der Beiträge Dritter erhielt Volvo für ihre Hybridbusse den Zuschlag. Der Ende 2018 gestartete Pilotbetrieb mit fünf batteriebetriebenen Elektrobussen (Linie 17) wird vom Kanton Bern, der Stadt Bern, der Gemeinde Köniz, von ewb aus dem Ökofonds und von Bernmobil finanziert (4.5 Mio. Franken).

Basel-Landschaft

Das Gesetz zur Förderung des öffentlichen Verkehrs vom 18. April 1985 enthält keine Vorgabe oder Ziele betreffend den Einsatz emissionsarmer und energieeffizienter Fahrzeuge. Mit dem Ziel, den künftigen Verkehr möglichst effizient, wirtschaftlich und umweltgerecht zu bewältigen, sind im kantonalen Richtplan Planungsgrundsätze definiert. Gemäss der Vorlage zum 8. Generellen Leistungsauftrag (GLA) im Bereich des öffentlichen Verkehrs für die Jahre 2018–2021 vom 16. November 2016 strebt der Kanton im Verkehr eine Reduktion der Emissionen an. Bei der Bestellung des ÖV und bei der Beschaffung der Fahrzeugflotte sind umweltfreundliche Antriebssysteme zu unterstützen. Dementsprechend können die

⁵⁹ Stadt Bern : Eigentümerstrategie BERNMOBIL 2017–2020, [https://www.bernmobil.ch/file/Unternehmen/Portrait/%C3%9Cber%20uns/Eigent%C3%BCmerstrategie%20BERNMOBIL%202017-2020%20\(PDF%2C%2094%20KB\).pdf](https://www.bernmobil.ch/file/Unternehmen/Portrait/%C3%9Cber%20uns/Eigent%C3%BCmerstrategie%20BERNMOBIL%202017-2020%20(PDF%2C%2094%20KB).pdf)

⁶⁰ Reglement Energie Wasser Bern (ewb-Reglement; ewr) vom 15. März 2001, SSSB 741.1.

⁶¹ ewb 2019: Geschäfts- und Nachhaltigkeitsbericht 2018, Bern, 2019.

⁶² Bernmobil 2015: 21 umweltfreundliche Hybrid-Gelenkbusse für BERNMOBIL, Medienmitteilung, September 2015.

Mehrkosten grundsätzlich aus dem ordentlichen ÖV-Budget finanziert werden. Bei den Infrastrukturinvestitionen wird die Beteiligung Dritter angestrebt. In den Eigentümerstrategien für Baselland Transport AG und Autobus AG sind keine Umweltziele vorgegeben.⁶³

Das kantonale Förderprogramm für Energieeffizienz und erneuerbare Energien («Baselbieter Energiepaket») fokussiert auf den Gebäudebereich. Busbeschaffungen und entsprechende Lade-/Tankinfrastruktur werden daher nicht zusätzlich finanziell gefördert.⁶⁴

Beispiel Baselland Transport AG (BLT)

Im Rahmen der Energiestrategie 2050 beauftragte das Bau- und Umweltschutzdepartement (BUD) die BLT, einen Pilotbetrieb mit fünf Elektrobussen durchzuführen und die Beschaffung öffentlich auszuschreiben. Die Ausschreibung der Busse ist abgeschlossen.⁶⁵ Die BLT plant, ab Dezember 2020 den Betrieb der Linie 37 mit Elektrobussen aufzunehmen. Zur Finanzierung der (Mehr-)Investitionskosten wurde ein Gesuch beim BUD als Besteller eingereicht. Zusätzlich wird eine Mitfinanzierung der Busse bzw. der Landeinfrastruktur durch das Instrument CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure bzw. das BAV (vgl. Kap. 5.2.2) angestrebt.

Basel-Stadt

Im Rahmen des Projekts «2000-Watt-Gesellschaft – Pilotregion Basel» wurden bis 2018 lokale Pilotprojekte gefördert. Die Finanzierung erfolgte aus Rahmenkrediten, die der Grosse Rat gesprochen hatte. In diesem Rahmen testeten die Basler Verkehrsbetriebe zwei E-Kleinbusse.⁶⁶

Mit der Änderung des ÖV-Gesetzes⁶⁷ im Juli 2015 wird der Kanton mit § 5 Abs. 1^{ter} ÖV-Gesetz verpflichtet, im Ortsverkehr ab 2027 nur noch Leistungen zu bestellen, die mit 100% erneuerbarer Energie erbracht werden. Begründete Ausnahmen sind möglich. Im ÖV-Programm 2018–2021 des Regierungsrates des Kantons vom 16. November 2016 wurde ein entsprechender strategischer Schwerpunkt aufgenommen. Vor diesem Hintergrund plant die BVB die Elektrifizierung der Bus-Flotte. Zur Finanzierung weiterer Busbeschaffungen wird dem Grossen Rat voraussichtlich im Jahr 2020 ein Ratschlag vorgelegt. Investitionen in die Infrastruktur und Fahrzeuge werden über Darlehen des Kantons an die BVB finanziert; die Betriebskosten über

⁶³ FV BL 2016: Eigentümerstrategie Baselland Transport AG (BLT), <https://www.baselland.ch/politik-und-behorden/direktionen/finanz-und-kirchendirektion/finanzverwaltung/beteiligungen/faktenblatter/hinterlegte-dokumente/eigentuemerstrategie-bl.pdf>, Januar 2016; FV BL 2015: Eigentümerstrategie Autobus AG Liestal (AAGL), https://www.baselland.ch/politik-und-behorden/direktionen/finanz-und-kirchendirektion/finanzverwaltung/beteiligungen/faktenblatter/hinterlegte-dokumente/eigentuemerstrategie-aagl.pdf/@download/file/eigentuemerstrategie_AAGL.pdf, April 2015.

⁶⁴ Verordnung über Förderbeiträge nach dem Energiegesetz vom 15.12.2009 (Stand 1.1.2017), <https://www.energiepaket-bl.ch/de/foerderverordnung>.

⁶⁵ BLT 2019: Zuschlag Ausschreibung Elektrobuss-Beschaffung 2020, Medienmitteilung, https://www.bl.ch/fileadmin/user_upload/PDF_Content/PDF_Medienmitteilungen/27-06-2019_BLT_Medienmitteilung_Zuschlag_Ausschreibung_Elektrobuss-Beschaffung_2020.pdf, Oberwil, 27. Juni 2019.

⁶⁶ Kanton Basel-Stadt o.D.: Pilotregion Basel, <https://www.klimaschutz.bs.ch/informationen-und-netzwerke/plattformen-und-netzwerke/pilotregion-basel.html>, abgerufen am 23.03.2020.

⁶⁷ SG 951.100.

das Globalbudget ÖV. Für den Aufbau und Betrieb der notwendigen Ladeinfrastruktur strebt die BVB eine Zusammenarbeit mit den Industriellen Werke Basel (IWB) an.⁶⁸

Gemäss Ratschlag Gesamtkonzept Elektromobilität vom 3. Juli 2019⁶⁹ sind im Rahmen des ordentlichen Ersatzes bei der Verwaltung und staatsnahen Betrieben, die über eine grössere Flotte verfügen (wie z.B. BVB), Fahrzeuge mit Elektroantrieb zu beschaffen. Die Eignerstrategie für die BVB des Regierungsrates soll entsprechend angepasst werden. Je nach Umfang einer Ersatzbeschaffung, welche über den üblichen Beschaffungsprozess erfolgt, werden die erforderlichen Mittel mit separaten Vorlagen beantragt.

Kanton Freiburg

Das Verkehrsgesetz vom 20.09.1994 legt fest, dass ein Gesamtverkehrssystem zur Sicherstellung der Mobilität insbesondere auch den Anforderungen des Umweltschutzes Rechnung tragen soll. Im kantonalen Verkehrsplan sind keine Massnahmen betreffend die Umsetzung des Umweltschutzes konkretisiert. Im Massnahmenplan zur Luftreinhaltung 2020, der derzeit in Bearbeitung ist, sind Massnahmen betreffend der im ÖV eingesetzten Fahrzeuge zur Minderung der CO₂-Emissionen vorgesehen. Ebenfalls in Bearbeitung ist ein kantonaler Klimaplan.

Beispiel Agglomeration Fribourg und Transports publics fribourgeois (TPF)

In Übereinstimmung mit dem regionalen Richtplan (Agglomerationsprogramm der 3. Generation), der eine Strategie für die nachhaltige Verkehrs- und Siedlungsentwicklung vorsieht, sollen im Rahmen der geplanten Erneuerung der Busflotte auf der Linie 1 bis 2021 batteriebetriebene Trolleybusse beschafft und eingesetzt werden.⁷⁰ Es ist vorgesehen, dass der Kanton für die Beschaffung von 10 Batterie-Trolleybussen durch die TPF bedingt rückzahlbare Darlehen gewährt.

Kanton Genf

Das Mobilitätsgesetz (Loi sur la mobilité du 23 septembre 2016, LMob) legt fest, dass die Mobilitätspolitik mit der Energie- und Umweltpolitik koordiniert wird. Es wird das Ziel verfolgt, den Energieverbrauch zu senken und der Nutzung erneuerbarer Energien Vorrang einzuräumen. Die Ziele des Bundes und der Kantone insbesondere in den Bereichen Luft-, Lärm- und Klimaschutz in dicht besiedelten Gebieten sind zu berücksichtigen.

⁶⁸ BVB 2019: Bussystem 2027 – Die Planungen zur Elektrifizierung der BVB-Busflotte sind auf Kurs, Medienmitteilung vom 28.11.2019, <https://www.klimaschutz.bs.ch/informationen-und-netzwerke/plattformen-und-netzwerke/pilotregion-basel.html>, Basel, 2019.

⁶⁹ Vgl. Regierungsrat des Kantons Basel-Stadt 2019 : Ratschlag Gesamtkonzept Elektromobilität, <https://www.bs.ch/dam/jcr:75f79327-6868-49a0-ab4f-f6d666cdb694/Ratschlag%20Gesamtkonzept%20Elektromobilit%C3%A4t.pdf>, abgerufen am 23.03.2020.

⁷⁰ Vgl. Agglo Fribourg o.D.: Busnetz der Agglomeration (Zone 10), <https://www.agglo-fr.ch/de/mobilitaet/busnetz-zone-10-agglomeration-freiburg>, abgerufen am 23.03.2020.

Die Finanzierung neuer Verkehrsinfrastruktur (z.B. Trolleybuslinien und Trams) ist im Gesetz über die öffentliche Verkehrsinfrastruktur (Loi sur le réseau des transports publics (LRTP) du 17 mars 1988) geregelt. Der Regierungsrat legt gestützt auf Art. 1 LRTP einen mehrjährigen Aktionsplan für das öffentliche Verkehrsnetz und dessen Entwicklung fest. Die Umstellung von Linien mit Dieselnissen auf Elektrobusse ist eine Massnahme im Massnahmenplan für den ÖV für die Jahre 2020 bis 2024 (PATC 2020–2024).⁷¹ Die Finanzierung erfolgt aus dem ordentlichen ÖV-Budget.

Beispiel TPG und TOSA (Trolleybus Optimisation Système Alimentation)

Auftrag, Ziele, Leistungen sowie finanzielle Mittel (Betriebskosten, Abschreibungen) der Transports publics genevois (TPG) sind gestützt auf dem PATC 2020–2024 in einer Leistungsvereinbarung mit dem Kanton Genf als Eigentümer der öffentlichen-rechtlichen Anstalt gemäss kantonalem Gesetz über die Transports publics genevois (Loi sur les Transports publics genevois (LTPG) du 21 novembre 1976) jeweils für fünf Jahre festgelegt. Das jährliche Budget wird vom Verwaltungsrat dem Regierungsrat (Conseil d'Etat) zum Entscheid vorgelegt. Die Leistungsvereinbarung und die jährlichen maximalen Beiträge werden durch das Parlament (Grand Conseil) genehmigt.⁷²

Die Umstellung der TPG-Linie 23 auf das neue System TOSA erfolgte nach einem Test eines Prototyps im Jahr 2017. Das Pilotprojekt wurde aus dem ordentlichen ÖV-Budget des Kantons finanziert und durch den Bund im Rahmen des Leuchtturmprogramms des BFE im Cleantech-Bereich (3.4 Mio. CHF) sowie die Beschaffung der Fahrzeuge durch das Instrument CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure bzw. das Förderprogramm «Hybrid- und Elektrobusse» gefördert (Einsparung von rund 1'000 t CO₂ p.a., d.h. Beitrag von 112'000 CHF).⁷³ Künftig sollen zwei neue Elektrobuslinien (ab 2020 Linie 4 und ab 2024 Linie 22) rund 50 Dieselnisse ersetzen. Das Ziel ist, alle Stadtlinien bis 2030 umzustellen. Die Kosten betragen rund 34 Mio. CHF (28 Busse für Linie 4) bzw. 12 Mio. CHF (14 Busse für Linie 22).⁷⁴

Kanton Glarus

In § 5 des kantonalen Gesetzes über den öffentlichen Verkehr (öV-Gesetz) vom 5. Mai 1996⁷⁵ wird festgehalten, dass die vom Bund nicht gedeckten Kosten für technische Verbesserungen, wie die Anschaffung von neuen Fahrzeugen oder das Erstellen neuer Anlagen und Einrichtungen durch Finanzhilfen des Kantons und der Gemeinden abgegolten werden. Konkrete Umweltziele für den ÖV wurden in diesem Gesetz nicht festgelegt.

⁷¹ Canton de Genève 2019: Plan d'actions des transports collectifs PATC 2020 –2024, adopté par le Conseil d'Etat le 17 Avril 2019 suite au vote du Grand Conseil du 22 Mars 2019

⁷² Z.B. Loi accordant une indemnité de 1 252 554 827 francs aux Transports publics genevois (TPG) pour les années 2020 à 2024 (12546) du 22 novembre 2019.

⁷³ Loi ouvrant un crédit d'investissement de 15 000 000 F pour le déploiement de la technologie TOSA sur une ligne pilote des Transports publics genevois (11720) du 4 décembre 2015.

⁷⁴ Grand Conseil 2019: Rapport de la commission des transports chargée d'étudier le projet de loi du Conseil d'Etat accordant une indemnité de 1 252 554 827 francs aux Transports publics genevois (TPG) pour les années 2020 à 2024, 5 novembre 2019 (PL 12546-A).

⁷⁵ GS VII D/6/1.

Gemäss kantonalem Energiegesetz (EnG) vom 7. Mai 2000⁷⁶ kann der Kanton Vorhaben zur Erhöhung der Energieeffizienz und Nutzung erneuerbarer Energien sowie von Abwärme fördern. Das kantonale Energie Förderprogramm 2020 fokussiert derzeit auf Massnahmen an und im Gebäude. Zur Finanzierung dient der kantonale Energiefonds. Massnahmen im Bereich der Mobilität waren aus Kostengründen bisher ausgeklammert. Derzeit wird die Erweiterung des kantonalen Energieförderprogramms geprüft.⁷⁷ Die aktuelle Förderpraxis im Bereich Mobilität und die Finanzierung des Energiefonds werden überprüft. Es ist daher allenfalls künftig möglich, dass auch Massnahmen im Bereich der umweltfreundlichen Mobilität aus dem Energiefonds gefördert werden.⁷⁸

Kanton Graubünden

§ 2 Abs. 2 des Gesetzes über den öffentlichen Verkehr im Kanton Graubünden (GöV) vom 7. März 1993⁷⁹ legt fest, dass der öffentliche Personen- und schienengebundene Güterverkehr mit dem Ziel gefördert werden soll, die Umwelt zu schützen und sparsam und wirtschaftlich Energie zu verwenden. Jedoch werden keine konkreten Ziele für einen nachhaltigen und fossilfreien Verkehr definiert, wie auch im kantonalem Energiegesetz (BEG)⁸⁰ nicht.

Das kantonale Förderprogramm berücksichtigt keine Massnahmen im Bereich Mobilität. In ausgewählten Gemeinden des Kantons Graubünden, die im Versorgungsgebiet des Elektrizitätswerks Zürich (ewz) liegen, haben Unternehmen Zugang zum Förderprogramm 2000-Watt-Gesellschaft (vgl. Kanton Zürich, Tabelle 20).

Kanton Jura

Im kantonalen ÖV-Gesetz (§ 23 Abs. 2 des Loi sur les transports publics vom 20. Oktober 2010⁸¹) ist festgehalten, dass kantonale Abgeltungen für Leistungen des öffentlichen Verkehrs lediglich denjenigen Unternehmen gewährt wird, welche effizient und umweltfreundlich agieren. Die *Conception directrice des transports publics* vom September 2015 hält keine Ziele oder Vorgaben zum Einsatz emissionsarmer Fahrzeuge im ÖV fest.

Im kantonalen Energiekonzept 2015–2021 und der kantonalen Energiestrategie 2035 sind keine Massnahmen im Mobilitätsbereich definiert.

⁷⁶ GS VII E/1/1.

⁷⁷ Beschluss, Sitzung des Landrates vom Mittwoch, 6. November 2019, § 185 Postulat BDP/GLP-Fraktion «Erweiterung des kantonalen Energieförderprogramms» (Bericht Regierungsrat), 10.09.2019.

⁷⁸ Kanton Glarus 2019: Energiefonds soll ausgebaut werden, <https://www.gl.ch/public-newsroom/details.html/31/news/9053>, abgerufen am 23.03.2020.

⁷⁹ BR 872.100.

⁸⁰ BR 820.200.

⁸¹ RSJU 742.21.

Beispiel PostAuto AG und Stadt Delémont

Delémont erhielt Ende 2018 den Titel der «Cité de l'énergie», welcher an Gemeinden und Städte verliehen wird, welche sich für die effiziente Nutzung von Energie, erneuerbaren Energien und den Klimaschutz engagieren. So fuhr in Delémont bereits im Jahr 2009 der erste Bus der PostAuto AG, der mit Erdgas angetrieben wurde.⁸² Obwohl dieses Projekt gestoppt wurde, da sich dieser Bus als ineffizient für das Streckenprofil herausgestellt hat, hat die Hauptstadt Juras insbesondere im Rahmen des Programms «Delémont, cap sur 2030» weitere Anstrengungen unternommen, um den fossilfreien Busverkehr voranzutreiben. Hierbei wurden Demonstrationsprojekte mit Elektrobussen, angetrieben mit lokalen erneuerbaren Energien, lanciert.⁸³

Kanton Luzern

In § 2 Abs. 2 des Gesetzes über den öffentlichen Verkehr (öVG) vom 22. Juni 2009⁸⁴ ist festgelegt, dass ein der Umwelt verpflichteter öffentlicher Personenverkehr anzustreben ist. Konkrete Vorgaben oder Ziele sind nicht definiert. Die Finanzierung der Transportunternehmen im ÖV erfolgt via Verkehrsverbund Luzern (VVL). Der Kanton und der VVL legen die mittel- bis langfristige Entwicklung des Angebots im öffentlichen Personenverkehr im mehrjährigen ÖV-Bericht fest (Kanton LU 2017).⁸⁵

Gemäss E-Bus-Strategie des VVL wird in der Agglomeration Luzern einerseits die Erweiterung des Batterie-Trolleybusnetzes unter Einbindung einzelner Dieselbuslinien verfolgt, andererseits sollen Dieselbusse durch Depotlader-Batteriebusse ersetzt werden (INFRAS 2019).⁸⁶ In einer Übergangsphase wird zudem eine Hybridisierung angestrebt. Die Finanzierung soll über das ordentliche ÖV-Budget erfolgen. Für die Depotlader-Batteriebusse wurden Pilotlinien evaluiert und fünf Linien ausgewählt (VVL 2020).⁸⁷

Das kantonale Förderprogramme «Energie» zur Förderung der Energieeffizienz und den Einsatz erneuerbarer Energien für Gebäude und das «Stromeffizienzprogramm» fördern keine Investitionen im ÖV.

⁸² RFJ 2009: Une première dans le Jura: un autobus roulera au gaz à Delémont, <https://www.rfj.ch/rfj/Actualite/Regionale/22109Une-premiere-dans-le-Jura-un-autobus-roulera-au-gaz-a-Delemont.html> abgerufen am 23.03.2020.

⁸³ RFJ 2017: Delémont veut être à l'heure du bus électrique, <https://www.rfj.ch/rfj/Actualite/Region/20170918-Delemont-veut-etre-a-l-heure-du-bus-electrique-1.html#> abgerufen am 23.03.2020.

⁸⁴ SRL Nr. 775.

⁸⁵ Kanton LU 2017: ÖV-Bericht 2018 bis 2021, Entwurf Kantonsratsbeschluss zum Bericht über die mittel- bis langfristige Entwicklung des Angebots für den öffentlichen Personenverkehr, 14. November 2017.

⁸⁶ INFRAS 2019: E-Bus-Strategie, Verkehrsverbund Luzern, Schlussbericht, Zürich, April 2019.

⁸⁷ VVL 2020: E-Bus-Strategie: Pilotlinien mit Batteriebusen im Kanton Luzern, Medienmitteilung, Luzern, 22. Januar 2020,

Beispiel Verkehrsbetriebe Luzern AG (VBL)

Die VBL erhielten über das Instrument CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure bzw. das Förderprogramm «Hybrid- und Elektrobusse» von myclimate finanzielle Förderungen für drei Hybridbusse (vgl. Kap. 5.2.2).

Im Hinblick auf die Beschaffung von Depotlader-Batteriebusse für die Pilotlinie 10 wird eine Finanzierung der Fahrzeuge über das ÖV-Budget zusammen mit einer Förderung durch myclimate vorgesehen. Die Finanzierung der Ladeinfrastruktur ist als Investitionsmassnahme eingeplant; allenfalls werden Förderbeiträge des Bundes angestrebt.

Kanton Neuenburg

Im Loi sur les transports publics (LTP) vom 14. August 1996⁸⁸ des Kantons Neuenburg ist festgehalten, dass das öffentliche Verkehrssystem unter anderem die Anforderungen an den Umweltschutz erfüllen sollen, und dass eine vernünftige Land- und Energienutzung beabsichtigt wird. Das ÖV-Konzept aus dem Jahr 2002 definiert grundsätzliche Umweltziele.⁸⁹ Derzeit wird eine Strategie erarbeitet.

Des Weiteren ist im kantonalen Loi sur l'énergie (LCEn)⁹⁰ festgelegt, dass die Infrastruktur und die Fahrzeuge für den öffentlichen Personenverkehr dem Stand der Technik entsprechen sollen, um eine vernünftige Energienutzung zu gewährleisten und Umweltschäden zu reduzieren. Im Rahmen des Gebäudeprogramms werden entsprechende Massnahmen gefördert. Subventionen werden durch den kantonalen Energiefonds finanziert.

Kanton Nidwalden

Im kantonalen Gesetz über die Förderung des öffentlichen Verkehrs (Verkehrsgesetz, ÖVG) vom 29. Januar 1997⁹¹ sind keine umwelt- und klimarelevanten Ziele oder Vorgaben festgehalten. Die ÖV-Strategie 2017–2020 enthält ebenfalls keine Ziele oder Vorgaben betreffend den Einsatz emissionsarmer Busse im ÖV.

Im Energieleitbild Nidwalden 2019, welches nach der nationalen Zustimmung zur Energiestrategie 2050 verfasst wurde, wird festgehalten, dass der Kanton die Entwicklung der Elektromobilität durch geeignete Infrastrukturen unterstützt.⁹² Das kantonale Förderprogramm fokussiert jedoch auf Gebäudemassnahmen.

⁸⁸ RSN 765.1.

⁸⁹ République et Canton de Neuchâtel 2000: Conception directive des transports collectifs, adoptée par le Grand Conseil le 2 octobre 2000, entrée en vigueur le 1er janvier 2001.

⁹⁰ RSN 740.1.

⁹¹ NG 652.1.

⁹² Regierungsrat Kanton Nidwalden o.D.: Energieleitbild Nidwalden 2019, https://www.nw.ch/docn/202816/Energieleitbild_Nidwalden.pdf abgerufen am 23.03.2020.

Kanton Obwalden

Der Kanton Obwalden setzt sich unter anderem zum Ziel, den öffentlichen Verkehr insbesondere in denjenigen Bereichen zu fördern, in welchen eine möglichst hohe Entlastung der Umweltbelastungen bewirkt werden kann (§ 2 Abs. 2 des Gesetzes über die Förderung des öffentlichen Verkehrs vom 21.05.2014⁹³). Vorgaben oder eine Strategie zum Einsatz von umweltfreundlichen Bussen existiert nicht. Die Finanzierung müsste über das ordentliche Budget erfolgen, die Finanzierung ist jedoch nicht gesichert.

Kanton Schaffhausen

Der Kanton Schaffhausen und die Gemeinden fördern den öffentlichen Verkehr unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit und der Ziele der Raumplanung (Art. 2 des Gesetzes über die Förderung des öffentlichen Verkehrs⁹⁴, § 9 der Verordnung zum ÖV-Gesetz⁹⁵). Eine konkrete Vorgabe zu emissionsarmen und energieeffizienten Fahrzeugen im ÖV gibt es derzeit nicht.

Der Regierungsrat hat im Anschlusskonzept zur kantonalen Energiepolitik die Ziele und Massnahmen in der Energiepolitik für die Periode 2018 bis 2030 festgelegt.⁹⁶ Er beabsichtigt u.a., eine Strategie Elektromobilität zu erarbeiten. Der Grundlagenbericht zu den Chancen der Elektromobilität im Kanton Schaffhausen soll Mitte 2020 veröffentlicht werden. Diese Auslegung soll aufzeigen, ob und wo Handlungsoptionen existieren.

Das kantonale Förderprogramm Energie 2020 setzt finanzielle Anreize im Gebäudebereich; es werden keine Investitionen für den öffentlichen Verkehr gefördert (Energie SH 2020).⁹⁷

⁹³ GDB 772.1.

⁹⁴ SHR 743.100.

⁹⁵ SHR 743.101.

⁹⁶ Bericht und Antrag des Regierungsrates des Kantons Schaffhausen an den Kantonsrat betreffend Schlussbilanz über die Periode 2008-2017 und Anschlusskonzept zur kantonalen Energiepolitik 2018-2030 (Orientierungsvorlage), Vorlage des Regierungsrates vom 8. Mai 2018, .

⁹⁷ Energie SH 2020: Förderprogramm Energie 2020 – Fördersätze und Bedingungen, 6. Januar 2020.

Beispiel Verkehrsbetriebe Schaffhausen (VBSH)

Die VBSH sind ein unselbstständiger Betrieb der Stadt Schaffhausen (Verwaltungsabteilung). Es gelten die verfassungsmässigen Finanzkompetenzen. Die Verkehrsbetriebe Schaffhausen (VBSH) möchten bis 2029 die gesamte Busflotte elektrifizieren. Die Volksabstimmung «Einführung von Elektrobussen mit Schnellladesystem» wurde am 17.11.2019 mit rund 54% angenommen. Die Umsetzung der Elektrifizierungsstrategie soll in zwei Etappen erfolgen.⁹⁸

In der Grundetappe sollen 15 Elektrobusse und die Ladeinfrastruktur angeschafft werden. Die Investitionskosten für die Grundetappe belaufen sich brutto auf 28.7 Mio. Franken. Es ist vorgesehen, dass davon mindestens 5.1 Mio. Franken vom Bund im Rahmen des Agglomerationsprogramms finanziert werden. Die Nettoinvestitionen werden von der Gemeinde finanziert; der Kanton beteiligt sich nicht daran. Die VBSH haben die für eine Teilnahme am Programm der Stiftung Klimaschutz und CO₂-Kompensation «KliK» des Instruments CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure (vgl. Kap. 5.2.2) notwendige Anmeldung eingereicht; ein Vertragsentwurf liegt vor. Zudem haben die VBSH ein Gesuch zur Förderung im Rahmen des Leuchtturmprogrammes beim BFE eingegeben.⁹⁹

Kanton Solothurn

Im § 1 des kantonalen Gesetzes über den öffentlichen Verkehr (ÖV-Gesetz) vom 27.09.1992¹⁰⁰ wird festgehalten, dass der öffentliche Verkehr mit dem Ziel zu fördern ist, das Umsteigen auf umweltschonende öffentliche Verkehrsmittel zu begünstigen. Mit dem Ziel der Dekarbonisierung des öffentlichen Verkehrs im Kanton Solothurn hat der Regierungsrat Ende 2019 entschieden, ein konkretes Förderkonzept für Elektrobusse bis Ende 2020 vorzulegen, um die Mehrkosten für die Beschaffung und den Betrieb zu decken.¹⁰¹

Gemäss Verordnung zum Energiegesetz über Staatsbeiträge (EnGVB)¹⁰² des Kantons Solothurn ist die finanzielle Förderung für Projekte zur Erprobung neuer Energietechnologien, für Demonstrationsanlagen oder für Spezialprojekte im Sinne der Energieeffizienz bzw. der erneuerbaren Energien möglich. Hierbei dürfen die Beiträge für solche Projekte, unter Anrechnung von Beiträgen des Bundes und von Dritten, 50% der Gesamtaufwendungen nicht übersteigen.

Kanton Schwyz

Im kantonalen Gesetz über die Förderung des öffentlichen Verkehrs vom 26. November 1987¹⁰³ sind keine Zielsetzungen oder Vorgaben bezüglich des Umweltschutzes und alternativen An-

⁹⁸ E-Bus: Einführung von Elektrobussen mit Schnellladesystem Erweiterung des VBSH-Depots Ebnat, Vorlage des Stadtrats vom 30. April 2019.

⁹⁹ E-Bus: Einführung von Elektrobussen mit Schnellladesystem Erweiterung des VBSH-Depots Ebnat, Vorlage des Stadtrats vom 30. April 2019.

¹⁰⁰ BGS 732.1.

¹⁰¹ Solothurner Zeitung 2019: Regierungsrat will E-Busse fördern, <https://www.solothurnerzeitung.ch/solothurn/kanton-solothurn/regierungsrat-will-e-busse-foerdern-136135565> abgerufen am 23.03.2020.

¹⁰² BGS 941.24.

¹⁰³ SRSZ 781.100.

triebstechnologien definiert. Die ÖV-Strategie 2030 vom April 2014 definierte zwei Massnahmen zur mittelfristigen Umsetzung. 1. Der Kanton setzt sich dafür ein, dass die Transportunternehmen umweltkonforme Fahrzeuge beschaffen. 2. Der Energieverbrauch pro Kurskilometer wird schrittweise gesenkt.

Das Kantonale Energiegesetz¹⁰⁴ sieht keine spezifischen Fördermassnahmen für eine nachhaltige Mobilität vor. Jedoch wurde in der Energiestrategie des Kantons Schwyz für die Jahre 2013–2020 vermerkt, dass die Anreize für den Einsatz von energie- und umwelteffizienten Motorfahrzeugen bei einer Gesetzesrevision zu erhöhen seien.¹⁰⁵

Gemäss einer Umfrage würde die Umsetzung einer elektrifizierten Buslinie im Kanton Schwyz geprüft. Jedoch seien die Finanzierungsbedingungen noch nicht ausgearbeitet.

Kanton St. Gallen

Gemäss kantonalem Gesetz über den öffentlichen Verkehr vom 17. November 2015 wird mit dem Gesetz eine umweltgerechte Mobilität angestrebt (Art. 1 Abs. 2 Bst. b). Für Massnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz können Beiträge an die Mehrkosten als einmalige oder wiederkehrende Abgeltungen an die KTU ausgerichtet werden (Art. 18 ÖVG).

In der Gesamtverkehrsstrategie sind entsprechende Grundsätze definiert. In der ÖV Strategie des Kantons St. Gallen sind zwei Ziele zur Reduktion des Energie- und Ressourcenverbrauchs sowie der Belastung von Bevölkerung und Umwelt definiert:

1. Die Energieeffizienz des öffentlichen Verkehrs wird erhöht.
2. Die Umweltbelastung des öffentlichen Verkehrs je Personenkilometer wird reduziert.

Die E-Bus Strategie des Kantons wird voraussichtlich im März 2020 abgeschlossen.

Beispiel Verkehrsbetriebe St. Gallen (VBSG)

Das Energiekonzept 2050 (EnK 2050) der Stadt St.Gallen hat fünf Grundsätze für eine nachhaltige Energiezukunft definiert. Im Mobilitätskonzept 2040 der Stadt aus dem Jahr 2015 ist festgehalten, dass der ÖV mit Elektrofahrzeugen oder Hybridfahrzeugen verkehren soll.

Für die Flottenerneuerung der VBSG und Umstellung von drei Linien (3, 4, 6) auf Batterietrolleybus-Betrieb beschloss das Stadtparlament einen Verpflichtungskredit von 37.5 Mio. CHF. Der Beschluss des Stadtparlaments wurde in einer Volksabstimmung im November 2018 angenommen. Eine Beteiligung des Bundes im Rahmen des Agglomerationsprogramms ist vorgesehen. Der Kanton als Besteller der Leistungen der VBSG wird die Mehrkosten (in Form von wiederkehrenden Abgeltungen) finanzieren.¹⁰⁶

¹⁰⁴ SRSZ 420.100.

¹⁰⁵ Regierungsrat des Kantons Schwyz 2013: Energiestrategie 2013 – 2020 des Kantons Schwyz, https://www.energie-zentral-schweiz.ch/fileadmin/user_upload/Downloads/SZ/13_SZ_Energiestrategie.pdf abgerufen am 23.03.2020.

¹⁰⁶ Volksabstimmung vom 25. November 2018 / 6, VBSG-Flottenerneuerung und Umstellung der Linien 3 Heiligkreuz – St.Josefen, 4 Wittenbach – Säntispark und 6 St.Georgen – Heiligkreuz auf Batterietrolleybus-Betrieb

Kanton Thurgau

Im § 1 Abs 2 des kantonalen Gesetzes über die Förderung des öffentlichen Verkehrs (FöVG) vom 01.07.2015¹⁰⁷ ist vermerkt, dass Fördermassnahmen zugunsten des öffentlichen Personenverkehrs unter anderem umweltgerecht¹⁰⁸ sein sollen. Gemäss Konzept RPV Kanton Thurgau 2019–2024 soll der öffentliche Verkehr so effizient und umweltschonend als möglich betrieben werden. Angebote des ÖV sind auf den neusten Stand der Umwelttechnik auszurichten, soweit dies verhältnismässig und wirtschaftlich zumutbar ist (§ 11 der Verordnung des Regierungsrates zum Gesetz über die Förderung des öffentlichen Verkehrs, FöVV).

Eine Strategie liegt noch nicht vor, ist aber in Planung. Im Grundlagenbericht «Chancen der Elektromobilität für den Kanton Thurgau» vom März 2018¹⁰⁹ wurden verschiedene Massnahmen formuliert, wobei der Einsatz von Elektrobussen im Rahmen von Pilot- und Demonstrationsprojekten getestet werden sollte.

Im kantonalen Energieförderprogramm werden keine Massnahmen zur Förderung emissionsarmer Busse finanziert.

Kanton Tessin

Das kantonale ÖV-Gesetz (Legge sui trasporti pubblici (LTPub) vom 6. Dezember 1994¹¹⁰) legt fest, dass der Kanton Studien, Forschungsarbeiten und die Erprobung neuer Techniken oder Dienstleistungen, die auf die Verringerung der Umweltauswirkungen abzielen, durchführen oder dazu beitragen kann.

Zusätzlich steht im § 7 des Energiegesetzes des Kantons Tessin (Legge cantonale sull'energia (Len)¹¹¹), dass der Kanton die nachhaltige Mobilität durch finanzielle Unterstützungen fördern soll. Konkrete Umsetzungsmassnahmen sind im kantonalen Energieplan von 2013 festgehalten.¹¹² Dieser sieht einen Fonds für die Förderung des nachhaltigen Strassenverkehrs vor. 95% der Gelder, d.h. rund 30 bis 35 Mio. Franken für den Zeitraum von 2014 bis 2020, werden für die Beschaffung von Fahrzeugen mit geringen CO₂-Emissionen¹¹³ gesprochen, wovon auch Unternehmen des öffentlichen Verkehrs profitieren können. Jedoch werden bis jetzt lediglich

¹⁰⁷ RB 742.1.

¹⁰⁸ In der Verordnung des Regierungsrates zum Gesetz über die Förderung des öffentlichen Verkehrs (FöVV) werden umweltgerechte Fördermassnahmen definiert als die Umstellung auf den neuesten Stand der Umwelttechnik, soweit dies verhältnismässig und wirtschaftlich zumutbar ist.

¹⁰⁹ Dept. für Inneres und Volkswirtschaft Thurgau 2018: Chancen der Elektromobilität für den Kanton Thurgau – Grundlagenbericht, https://energie.tg.ch/public/upload/assets/66092/2018-03-26_Chancen_Emob_TG_Grundlagenbericht_inkl_Titelbild_v2.pdf abgerufen am 23.03.2020.

¹¹⁰ RL 752.100.

¹¹¹ RL 740.100.

¹¹² GLEn 2013: Piano Energetico Cantonale (PEC) – Piano d'azione 2013, https://www4.ti.ch/fileadmin/GENERALE/piano_energetico_cantonale/documenti/PEC_Piano_azione_2013.pdf abgerufen am 23.03.2020.

¹¹³ Je weniger CO₂ ein Fahrzeug emittiert, desto höhere Subventionen werden bezahlt.

Fahrzeuge mit einem Maximalgewicht von 3.5 Tonnen subventioniert, während in Zukunft auch schwerere Fahrzeuge in Erwägung gezogen werden könnten.

Beispiel PostAuto AG und Azienda Elettrica Ticinese (AET)

2019 haben die PostAuto AG und der Tessiner Energiedienstleister AET eine Absichtserklärung unterzeichnet, gemeinsam die Elektromobilität im öffentlichen Verkehr im Kanton Tessin zu fördern.¹¹⁴ Die Kooperation sieht vor, dass die PostAuto AG die Nutzung und Verwaltung der Elektrofahrzeuge plant und die AET zusammen mit anderen Partnern die Ladeinfrastruktur und die erneuerbaren Energien bereitstellen. In einer ersten Phase sollen geeignete Fahrzeuge und Buslinien eruiert werden. Die Finanzierung der Mehrkosten ist noch ungeklärt.

Kanton Uri

Das Urner Gesetz über die Förderung des öffentlichen Verkehrs (Verkehrsgesetz) vom 22. September 1996¹¹⁵ sieht vor, dass bei der Bestellung des Leistungsangebots unter anderem die nachhaltige Wirkung auf die Umwelt zu berücksichtigen sei. Eine Strategie zur Förderung alternativer Antriebe gibt es derzeit nicht.

Das Energiegesetz des Kantons Uri (EnG)¹¹⁶ legt fest, dass der Kanton Projekte und Anlagen in den Bereichen Forschung, Produktion, Nutzung, Verwendung und regionale Verteilung unterstützen kann. Er fördert namentlich Massnahmen zur sparsamen und rationellen Energienutzung im Zusammenhang mit erneuerbaren oder aus einheimischen Quellen stammenden Energieträgern und solche zum Zwecke der Abwärmenutzung. Im Rahmen des kantonalen Förderprogramms Energie 2020 werden keine Massnahmen im ÖV gefördert.

Kanton Waadt

Im kantonalen ÖV-Gesetz (Loi sur la mobilité et les transports publics (LMTP) vom 11. Dezember 1990¹¹⁷) wird unter anderem das Ziel definiert, die Entwicklung der öffentlichen Verkehrsdienste zu fördern unter Berücksichtigung des Umweltschutzes und möglichen Energieeinsparungen. Das Gesetz ermöglicht Subventionen unter anderem für Investitionen in die Einrichtung, die Fahrzeugbeschaffung und die Einführung neuer Verkehrsmittel. Auch das Energiegesetz des Kantons Waadt (Loi sur l'énergie (LVLEne)¹¹⁸) verpflichtet den Kanton und die Gemeinden, die Nutzung des nachhaltigen Verkehrs zu fördern.

Der Kanton Waadt verfügt über ein Förderprogramm für Umsetzungsstudien zur Elektromobilität¹¹⁹, das seit Oktober 2019 in Kraft ist. Zulässig für diese finanzielle Unterstützung sind

¹¹⁴ Corriere del Ticino 2019: Autobus elettrici per il Ticino, <https://www.cdt.ch/ticino/autobus-elettrici-per-il-ticino-BC1848047?refresh=true>

¹¹⁵ RB 50.5111.

¹¹⁶ RB 40.7211.

¹¹⁷ BLV 740.21.

¹¹⁸ BLV 730.01.

¹¹⁹ Das Förderprogramm heisst Subvention des études municipales visant la promotion de la mobilité électrique.

unter anderem Studien, die die Nutzung von Elektrofahrzeugen des Personentransports und auch deren Ladeinfrastruktur untersuchen. Unterstützt werden hierbei Studien von einzelnen Gemeinden oder einem Zusammenschluss von Gemeinden, während sonstige Institutionen und Unternehmen von diesem Programm nicht profitieren können.

Beispiel Transports Publics de la Région Lausannoise sa (TL)

Nach einer Testphase in Lausanne im Jahr 2017 mit einem Doppelgelenk-Trolleybus der Verkehrsbetriebe Luzern hat die TL entschieden ab Ende 2020 schrittweise zwölf dieser Busse in Betrieb zu nehmen. Die Gesamtkosten dieser Busse beläuft sich auf rund 16.5 Mio. Franken.¹²⁰ In der Umfrage von Infrac, die begleitend zu diesem Bericht durchgeführt wurde, hat das Unternehmen erwähnt, dass es im Zuge seiner Dekarbonisierungsstrategie vor allem auf Oberleitungsbusse/Trolleybusse setzt, da diese für ihre Zwecke die höchste Energieeffizienz aufweisen. Für die Beschaffungen dieser Busse habe das Unternehmen bisher keine Fördermittel erhalten, da sich die bestehenden Förderprogramme in erster Linie auf Elektrobusse fokussiere.

Kanton Zug

Das kantonale Gesetz über den öffentlichen Verkehr vom 22. Februar 2007¹²¹ sieht keine Ziele oder Vorgaben bezüglich des Umweltschutzes vor. Bezüglich der Förderung eines fossilfreien Busverkehrs wird im Kantonalen Richtplan vom 6. September 2018¹²² festgehalten, dass sich der Fahrzeugeinsatz am Stand der Technik orientieren soll. Mehrkosten können grundsätzlich über das ÖV-Budget finanziert werden.

Jedoch ermöglicht das Zuger Energiegesetz¹²³ dem Kanton mit Rahmenkrediten Förderprogramme durchzuführen, die sich an den Chancen der erneuerbaren Energien im Kanton orientiert. Das kantonale Energieprogramm fokussiert auf Gebäude.

Beispiel Zuger Verkehrsbetriebe (ZVB)

Die ZVB hat einige Testfahrten mit Elektrobussen durchgeführt, um Erkenntnisse zu gewinnen über deren Einsatz auf dem Zuger Liniennetz, wobei unter anderem die Reichweite auf der Bergstrecke und die Stromerzeugung bei der Fahrt ins Tal geprüft werden sollte. Im Herbst 2019 hat die ZVB, in Kooperation mit der Bus Ostschweiz AG, dann den ersten vollelektrischen Bus mit Depotladesystem eingeführt. Sobald technisch machbar und finanziell tragbar werde die ZVB die Elektromobilität weiter ausbauen.¹²⁴

Kanton Wallis

¹²⁰ TL o.D.: Une nouvelle étape dans la concrétisation des projets de bus à haut niveau de service (BHNS) de l'agglomération lausannoise, <https://www.t-l.ch/en/component/content/article/119-communicues-de-presse/archives-2019/748-une-nouvelle-etape-dans-la-concretisation-des-projets-de-bus-a-haut-niveau-de-service-bhns-de-l-agglomeration-lausannoise>, abgerufen am 23.03.2020.

¹²¹ BGS 751.31.

¹²² BGS 711.31.

¹²³ BGS 740.1.

¹²⁴ ZVB o.D.: Testbetrieb mit Elektro-Gelenkbus, <https://www.zvb.ch/unternehmen/zvb-news/detail/testbetrieb-mit-elektro-gelenkbus/>, abgerufen am 23.03.2020.

Das Walliser Gesetz über den öffentlichen Verkehr (GöV) vom 28.09.1998¹²⁵ soll unter anderem die Wahrung und den Schutz der Umwelt und den rationellen Energieverbrauch bezwecken. Das kantonale Energiegesetz (kEnG)¹²⁶ ermöglicht mittels eines Energiefonds die Finanzierung von Fördermassnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien. Im Förderprogramm im Energiebereich 2020 sind keine Massnahmen im ÖV vorgesehen.¹²⁷

Langfristig hat sich der Kanton Wallis das Ziel gesetzt, zwischen 2015 und 2035 den Energieverbrauch in der Mobilität um 46% zu reduzieren, unter anderem durch die Förderung der Elektromobilität.¹²⁸ Gemäss einer Umfrage werden im Kanton Wallis die Mehrkosten vergütet, welche bei der Beschaffung eines Busses mit alternativem Antrieb entstehen im Vergleich zu einem Standard-Dieselbus.

Kanton Zürich

Im Gesetz über den öffentlichen Personenverkehr (PVG) vom 6. März 1988 sind keine gesetzlichen Vorgaben oder Ziele betreffend den Einsatz emissionsarmer, energieeffizienter Fahrzeuge enthalten. Der Züricher Verkehrsverbund (ZVV) hat für die Gewährleistung einer Grundversorgung zu sorgen. Das Gesamtverkehrskonzept des Kantons Zürich 2018 verfolgt das Ziel der Verminderung des Ressourcenverbrauchs und der Belastung von Mensch und Umwelt (Kanton Zürich 2018).¹²⁹ Gemäss Handlungsschwerpunkt HS8 wird die Verwendung von umweltfreundlichen Fahrzeugen, z.B. im Rahmen von Pilotprojekten von öffentlichem Interesse, unterstützt. Der ZVV fördert unter Einhaltung der Vorgaben des Kantonsrats die Beschaffung energieeffizienter Fahrzeuge im ÖV (Hybrid- und Trolleybusse) unter Berücksichtigung eines angemessenen Kosten-Nutzen-Verhältnisses. Die Finanzierung erfolgt entsprechend aus dem ordentlichen ÖV-Budget (gemäss ZVV-Modell). Ein zusätzliches kantonales Förderprogramm unter Einbezug des ÖV existiert nicht.

Gemäss ZVV-Strategiebericht wird eine umweltgerechte und energieeffiziente Leistungserbringung angestrebt (ZVV 2019).¹³⁰ Die Erarbeitung eines Gesamtkonzepts Elektromobilität für die Stadt Zürich ist aktuell ausgeschrieben und soll bis Ende 2021 vorliegen.

¹²⁵ SGS 740.1.

¹²⁶ SGS 730.1.

¹²⁷ <https://www.vs.ch/documents/87616/2371334/Richtlinie+zu+den+F%C3%B6rderprogrammen+im+Energiebereich+2017+im+Kanton+Wallis/fa1e1caf-76d4-409a-8d0b-70624a35c103>.

¹²⁸ Kanton Wallis 2019: Energieland Wallis: Gemeinsam zu 100% erneuerbarer und einheimischer Versorgung – Vision 2060 und Ziele 2035, <https://www.vs.ch/documents/87616/178920/Vision+2060+und+Ziele+2035/00ebb43e-cc87-4ca2-a85a-8845e99d5c20?t=1556531678593> abgerufen am 23.03.2020.

¹²⁹ Kanton Zürich 2018: Gesamtverkehrskonzept Kanton Zürich 2018, Regierungsrat des Kantons Zürich mit Beschluss vom 9. Januar 2018 (RRB Nr. 25/2018).

¹³⁰ ZVV 2019: Strategie 2022–2025, Grundsätze über die Entwicklung von Angebot und Tarif im öffentlichen Personenverkehr, Erläuternder Bericht, Zürich, Juli 2019.

Beispiel Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ)

In der Stadt Zürich erfolgt gemäss Elektrobussstrategie der Verkehrsbetriebe Zürich («eBus VBZ») die Umstellung je nach Einsatzgebiet bzw. Anwendungsfall von Dieselbuslinien auf Hybrid- und Elektrobusse. Im Rahmen des Förderprogramms «Elektro- und Hybridbusse» von myclimate wurde die Beschaffung von 19 Hybridbussen durch VBZ finanziell gefördert (vgl. Kap. 5.2.2). Die VBZ hat den Vertrag mit myclimate per Ende 2019 beendet, um die CO₂-Reduktionen vollständig durch die VBZ anrechnen lassen und damit einen Beitrag an die Umweltziele der Stadt Zürich im Rahmen der 2000-Watt-Gesellschaft geltend machen zu können. Die Umstellung von Linien mit Dieselbussen auf Trolleybusbetrieb (Linien 69 und 80) wird im Rahmen des Agglomerationsprogramms des Bundes (3. Generation) mit 40% der anrechenbaren Kosten mitfinanziert. Zudem werden neue Trolleybus-Modelle getestet. Die VBZ haben in Zusammenarbeit mit der Industrie und Schweizer Hochschulen eine Version «plus» des SwissTrolley-Modells entwickelt und nach dem Test mit einem Prototyp im Einsatz. Der Bund hat dieses Vorhaben im Rahmen des Leuchtturmprogramms des BFE im Cleantech-Bereich unterstützt.

Die Beschaffung von emissionsarmen und energieeffizienten Fahrzeugen und der Ladeinfrastruktur im Versorgungsgebiet des Elektrizitätswerks Zürich (ewz) kann zudem auch über das Förderprogramm 2000-Watt-Gesellschaft bzw. aus dem Stromsparfonds mitfinanziert werden. Seit 1991 werden Beiträge an Stromsparmassnahmen und zur Förderung von erneuerbaren Energien aus dem Stromsparfonds ausgerichtet. Seit 2016 werden die Fördermassnahmen zur Förderung der 2000-Watt-Ziele beim Elektrizitätswerk Zürich zusammengefasst (Tabelle 20).

Tabelle 20: Förderprogramm 2000-Watt-Gesellschaft (Zürich / Graubünden)

Förderprogramm	2000-Watt-Gesellschaft
Träger	Elektrizitätswerk Zürich (ewz)
Laufzeit	unbefristet
Zweck und Ziele	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Effiziente Verwendung von Elektrizität ▪ Nutzung von erneuerbaren Quellen zur Elektrizitätserzeugung ▪ Treibhausgasreduktion durch effiziente Stromanwendungen
Gegenstand	<p>Gemeinwirtschaftliche Leistungen, die das ewz im Auftrag der Stadt Zürich erbringt und für die das ewz gemäss dem Stromversorgungsgesetz einen Beitrag auf das Netznutzungsentgelt erhebt</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ strombasierte Energieberatung ▪ Rückvergütungen an Kunden und Kundinnen ▪ Beiträge an stadteigene Unternehmen, Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, Bildungs- und Sensibilisierungsmassnahmen, u.a.: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anlagen, die Strom aus erneuerbaren Energiequellen erzeugen (z. B. Photovoltaik-Anlagen, Biogasanlagen, Kleinwasserkraftwerke und Windanlagen); ▪ Anlagen und Geräte, die die Elektrizität besonders sparsam nutzen (z. B. Stromsparlampen, Kühl- und Tiefkühlgeräte sowie Elektromobile mit besonders niedrigen Verbrauchswerten); ▪ Anlagen und Massnahmen, die den Elektrizitätsverbrauch vermindern (z. B. Erneuerung von elektrischen Beleuchtungsanlagen und Verbesserung von elektrischen Antrieben); ▪ Anlagen und Massnahmen zur effizienten Stromanwendung, die einen namhaften Beitrag zur Treibhausgasreduktion leisten (z. B. Anlagen zur Nutzung von Umgebungs- und Abwärme sowie Elektromobilität);

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie Pilotanlagen zur rationellen Elektrizitätserzeugung und -verwendung sowie zur effizienten strombasierten Substitution von fossilen Energieträgern.
Empfänger	Privatpersonen, Unternehmen und Institutionen im Verteilnetzgebiet der Stadt Zürich und weiteren Ortschaften, wenn ein entsprechender Leistungsauftrag erteilt wurde ¹³¹
Art und Umfang	<p>Beiträge für Massnahmen und Anlagen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ i.d.R. Investitionsbeiträge, die individuell und pauschal festgelegt werden, u.a.: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Förderung private Ladeinfrastruktur: Gefördert werden Ladestellen mit einer Leistung bis 22 kW. Für Ladestellen ohne Lastmanagement beträgt der Förderbeitrag 40% der Kosten der Ladeinfrastruktur und der direkten Installationskosten oder 80 CHF/kW Anschlussleistung. Massgebend ist der tiefere Betrag. Für Ladestellen mit Lastmanagement beträgt der Förderbetrag 60% der Kosten der Ladeinfrastruktur und der direkten Installationskosten oder 150 CHF/kW Anschlussleistung. Massgebend ist der tiefere Betrag. ▪ Förderung öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur: Für Ladestellen bis 22 kW mit Wechselstrom (AC) beträgt der Förderbeitrag 40% der Kosten der Ladeinfrastruktur und der direkten Installationskosten oder 120 CHF/kW Anschlussleistung. Massgebend ist der tiefere Betrag. Ladestellen mit einer Anschlussleistung grösser 22 kW (sog. Schnellladestationen) werden mit Gleichstrom (DC) betrieben. Der Förderbeitrag beträgt 60% der Kosten der Ladeinfrastruktur und der direkten Installationskosten oder 200 CHF/kW Anschlussleistung. Massgebend ist der tiefere Betrag. ▪ Förderung Ladeinfrastruktur öffentlicher Personennahverkehr: Der Förderbeitrag beträgt 40% der Kosten der Ladeinfrastruktur und der direkten Installationskosten. ▪ Förderung Elektrobusse des öffentlichen Personennahverkehr: Der Förderbeitrag beträgt 30% des Neupreises des Fahrzeugs einschliesslich Batterie oder 30% der Leasingkosten. ▪ weitere nationale, kantonale, kommunale oder private Fördermittel werden bei der Festlegung der Beiträge berücksichtigt (Subsidiaritätsprinzip)
Verfahren	Antrag auf Förderung (Beitragsgesuch an ewz)
Förder-richtlinie und weitere Unterlagen	<p>Verordnung über gemeinwirtschaftliche Leistungen des Elektrizitätswerks der Stadt Zürich (ewz) im Rahmen der 2000-Watt-Ziele (VGL ewz)</p> <p>Ausführungsbestimmungen zur Verordnung über gemeinwirtschaftliche Leistungen des Elektrizitätswerks der Stadt Zürich (ewz) im Rahmen der 2000-Watt-Ziele (AB VGL ewz)</p> <p>ewz 2019: Profitieren Sie von Fördergeldern und Energieberatung, https://www.ewz.ch/content/dam/ewz/Privatkunden/Liegenschaften/Energieberatung/Brosch%C3%BCre_2000_Watt_Beitr%C3%A4ge.pdf, abgerufen am 17.01.2020</p> <p>ewz 2020: 2000-Watt-Beiträge, https://www.ewz.ch/de/privatkunden/liegenschaften/energieberatung/foerderbeitrag.html?from=www.ewz.ch/webportal/2000-watt-beitraege&destinationUrl=/content/site/ewz/webportal/de/meta/vanity-urls/2000-watt-beitraege-vanity.html, letzter Zugriff am 17.01.2020</p>

Tabelle INFRAS.

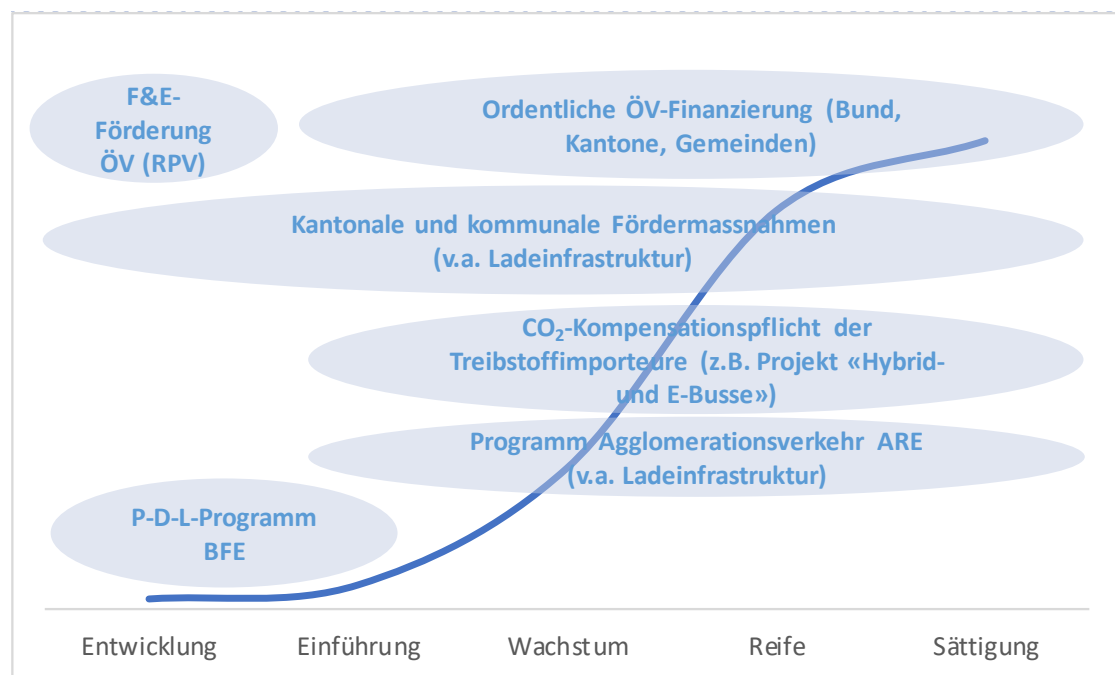
¹³¹ Beitragsberechtigte Ortschaften im Kanton Graubünden: Almens, Alvaschein, Bivio, Brienz/Brinzauls, Cazis, Cunter, Dalin, Feldis, Flerden, Fürstenu, Fürstenaubruck, Lantsch/Lenz, Lain, Lenzerheide, Marmorera, Masein, Medels, Mon, Muldain, Mulegns, Mutten, Nufenen, Parsonz, Paspels, Portein, Pratval, Präz, Riom, Rodels, Rona, Rothenbrunnen, Salouf, Sarn, Savognin, Says, Scharans, Scheid, Solis, Stierva, Summaprada, Sur, Tartar, Tiefencastel, Tinizong, Trans, Trimmis, Tschappina (ohne Fraktion Glas), Tumeagl/Tomils, Untervaz, Urmein, Valbella, Zorten.

5.2.4. Zwischenfazit

Die verschiedenen bereits bestehenden nationalen Förderinstrumente bzw. -massnahmen und die ordentliche ÖV-Finanzierung decken gesamthaft betrachtet grundsätzlich alle Phasen des Lebenszyklus einer Technologie ab (Abbildung 35). Kantonale und kommunale Fördermassnahmen zusätzlich zur ordentlichen ÖV-Finanzierung sind eher die Ausnahme.

Betreffend des Instruments CO₂-Kompensationspflicht der Treibstoffimporteure (Kompensationsprojekt «Hybrid- und E-Busse») gehen wir davon aus, dass dieses bis zur Phase des Marktwachstums bzw. der Reife relevant sein dürfte. Das Kriterium der Zusätzlichkeit dürfte jedoch ab einem gewissen Grad der Marktdurchdringung von Hybrid- und Elektrobusen und Vorgaben von Bestellern im Rahmen der Bestellung und ordentlichen Finanzierung von Angeboten oder allenfalls auch im Rahmen des öffentlichen Beschaffungsrechts nicht mehr gegeben sein und Minderemissionen entsprechend nicht mehr geltend gemacht werden können.

Abbildung 35: Einordnung



Grafik INFRAS.

Zuständigkeiten, Förderumfang und Geltungsbereich variieren bei den bestehenden Finanzierungsmöglichkeiten und Fördermassnahmen (Tabelle 21). Auch die Prozesse folgen unterschiedlichen Gesetzmässigkeiten. Die ordentliche ÖV-Finanzierung und das PAV sind regelmässig laufende Prozesse, wobei diese i.d.R. alle zwei bzw. vier Jahre beginnen. In der ordentlichen

ÖV-Finanzierung sind alle drei Ebenen der Gebietskörperschaften involviert, wobei den Kantonen eine zentrale Rolle zukommt. Zusätzliche Fördermassnahmen auf kantonaler und kommunaler Ebene existieren nur in einzelnen Fällen. Die Situation ist entsprechend komplex.

Tabelle 21: Übersicht bestehender Finanzierung im ÖV und Fördermassnahmen

Finanzierungs-/Fördermöglichkeit	Zuständigkeit	Fahrzeuge		Ladeinfrastruktur		Marktbereich		
		Inv./ Abschr.	BK	Inv./ Abschr.	BK	OV	RPV	FV
Ordentliche ÖV-Finanzierung (Bund, Kantone, Gemeinden)	Bund, Kantone, Gemeinden	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
F&E sowie Innovationen im ÖV aus RPV-Kredit (ab 2022)	Bund (BAV)	✓		✓		(✓)***	✓	(✓)***
P-D-L-Programm	Bund (BFE)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Programm Agglomerationsverkehr (PAV)*	Bund (ARE)	(✓)		✓		✓	(✓)	
CO ₂ -Kompensationspflicht Treibstoffimporteure, myclimate Kompensationsprojekt «Elektro- und Hybridbusse»**	myclimate / KliK Bund (BAFU/BFE)	✓				✓	✓	✓
Kantonales Förderprogramm Ladeinfrastruktur (Bsp. Bern)	Kanton			✓		✓	✓	
Kommunale Förderung Ladeinfrastruktur (Bsp. Ökofonds/ewb)	Gemeinde			✓		✓	(✓)	
Kommunale Förderung Fahrzeug + Ladeinfrastruktur (Bsp. Stromsparfonds/ewz)	Gemeinde	✓		✓		✓	(✓)	

Legende: ✓ ja / (✓) unter gewissen Bedingungen möglich

Inv.: Investitionen, Abschr.: Abschreibung, BK: Betriebskosten, OV: Ortsverkehr, RPV: Regionaler Personenverkehr, FV: Fernverkehr

* Mitfinanzierung von Mehrkosten für die Beschaffung von Fahrzeugen (v.a. E-Fahrzeuge als Gelegenheits-/Depotlader), sofern diese zu Einsparungen der Infrastrukturkosten für Oberleitungen für Trolleybusse führen, möglich (Art. 17a Abs. 2^{bis} MinVG)

** Neu auch Hybrid-Trolleybusse

*** Forschung und Entwicklung (F&E)

Tabelle INFRAS.

Fördermassnahmen zusätzlich zur ordentlichen Finanzierung fokussieren v.a. auf elektrisch angetriebene Fahrzeuge (Tabelle 22). Biodiesel- und Biogas-Busse werden heute v.a. im Rahmen der ÖV-Bestellung finanziert. Neuartige Lösungen und Innovationen im Sinne der F&E sowie Innovationen im ÖV (BAV) und des P-D-L-Programms (BFE) sind im Hinblick auf die Marktdurchdringung nicht relevant. Das Programm für den Agglomerationsverkehr (ARE) finanziert v.a. infrastrukturseitige Massnahmen und nur in Ausnahmefällen die Beschaffung von Fahrzeugen. Das Instrument CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure bzw. das Kompensationspro-

jekt «Elektro- und Hybridbusse» ist das einzige ergänzende, bestehende Programm auf nationaler Ebene, welches zusätzlich zur ÖV-Finanzierung die Mehrkosten von fossilsfreien oder -armen Fahrzeugen finanziell fördert, wobei die Zusätzlichkeit erfüllt sein muss und sich das TU die CO₂-Reduktion im Falle deren Veräusserung an die kompensationspflichtigen Treibstoffimporteure nicht anrechnen lassen kann.

Tabelle 22: Finanzierung bzw. Fördermöglichkeiten von Fahrzeugen und Antriebstechnologien

	E-Depotlader	E-Gelegenheitslader	Batterie-Trolleybus	E-Bus mit Brennstoffzelle	Biodiesel-Bus	Biogas-Bus
Ordentliche ÖV-Finanzierung	■					
F&E sowie Innovationen im ÖV aus RPV-Kredit (ab 2022)*	■					
P-D-L-Programm*	■					
Programm Agglomerationsverkehr (PAV)**	■					
CO ₂ -Kompensationspflicht Treibstoffimporteure, myclimate Kompensationsprojekt «Elektro- und Hybridbusse»	■					
Kommunale Förderung Fahrzeug + Ladeinfrastruktur (Bsp. Stromsparfonds/ewz)	■					

* Es werden zwar keine Antriebstechnologien ausgeschlossen, die Fördermöglichkeiten haben jedoch an Bedeutung verloren (fehlender Innovationscharakter von neuen Investitionen).

** Mitfinanzierung von Oberleitungen, Ladestationen und Mehrkosten für die Beschaffung von Fahrzeugen (v.a. E-Fahrzeuge als Gelegenheits-/Depotlader), sofern diese zu Einsparungen der Infrastrukturkosten für Oberleitungen für Trolleybusse führen, möglich (Art. 17a Abs. 2^{bis} MinVG).

Tabelle INFRAS.

Die Stärken und Schwächen der bestehenden Finanzierungen und Fördermöglichkeiten werden zusammenfassend in Tabelle 23 dargestellt.

Tabelle 23: Stärken und Schwächen der Instrumente bzw. Fördermassnahmen

Möglichkeiten	Stärken	Schwächen
Ordentliche ÖV-Finanzierung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abgeltung jährlicher Mehrkosten für Fahrzeuge und i.d.R. auch Ladeinfrastruktur möglich (Bund sowie fast alle Kantone) ▪ Fortlaufender Prozess (Sicherstellung Grundversorgung) ▪ zusätzlich Investitionskredite möglich (Bund, Kantone, Gemeinden) sowie Bundesbürgschaft für Investitionen im RPV ▪ Schnittstelle zu Eignerstrategien (z.B. Basel-Stadt) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ an Budgetprozess gebunden (jährlich), i.d.R. Zusicherung für 2 J. (Verpflichtungskredit RPV des Bundes für vier Jahre) ▪ Orientierung i.d.R. am letzten Jahresbudget, finanzielle Ergiebigkeit fraglich (Mittelkonkurrenz bzw. Priorität Aufrechterhaltung bestehendes Angebot) ▪ Aktuelle keine Berücksichtigung von Umweltzielen im RPV (Qualitätsmesssystem, QMS) ▪ Unterschiedliche Rahmenbedingungen RPV und Ortsverkehr sowie zwischen den Kantonen ▪ Verfügbarkeit finanzieller Mittel bei Bund, Kantonen und Gemeinden sehr unterschiedlich
F&E sowie Innovationen im ÖV aus RPV-Kredit (ab 2022)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusätzliche Förderung von Innovationen im RPV (Entwicklung, Pilotversuche etc.) ▪ Schnittstelle zur ordentlichen Finanzierung ÖV (RPV) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beschränkung auf neuartige Lösungen (kein Pilotbetrieb/Markthochlauf), hat dadurch kaum eine Bedeutung ▪ Schwäche, wenn nur RPV profitiert ▪ an Budgetprozess gebunden ▪ finanzielle Ergiebigkeit (5 Mio. CHF p.a.) fraglich (z.B. Mehraufwand)
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturm-Programm (P-D-L)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusätzliche Förderung im Fern-, Regional- und Ortsverkehr von Fahrzeugen und Ladeinfrastruktur (Anschaffung und Betrieb) möglich ▪ Unterstützung der Netzerbildung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fokus auf Erprobung und Demonstration von Innovationen (kein Markthochlauf), verliert entsprechend an Bedeutung ▪ Zusätzliche Schnittstelle zur ordentlichen ÖV-Finanzierung
Programm Agglomerationsverkehr (PAV)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Relativ hohe, ergänzende Mitfinanzierung von Verkehrsinfrastrukturmassnahmen (Oberleitungen Trolleybusse, Ladestationen an Haltestellen oder in Depots inkl. nötiger Elektroinstallationen), wenn eine Gesamtkonzeption vorliegt (aus dem NAF) ▪ Mitfinanzierung Mehraufwand Rollmaterial (Strassenfahrzeuge mitgemeint), wenn erhebliche Infrastrukturkosten eingespart werden können (insbesondere die Mehrkosten neuer E-Bus-Generationen, welche oberleitungsfrei fahren können) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Keine generelle Förderung der Umstellung von Dieseln auf fossilfreie, energieeffiziente Busse (Mitfinanzierung in Ausnahmefällen) ▪ Verhältnismässig langer Prozessvorlauf (Infrastrukturplanungsprozess)

Möglichkeiten	Stärken	Schwächen
CO₂-Kompensationspflicht für Treibstoffimporteure, Projekt «Elektro- und Hybridbusse» von «myclimate»	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Förderung der Neubeschaffung von Hybrid- oder Elektrobussen (unabhängig ob Orts-, Regional- oder Fernverkehr) statt Dieselbusse sowie neu auch Hybrid-Trolleybusse ▪ Möglichkeit der Vorfinanzierung zum Zeitpunkt der Investition ▪ Keine öffentlichen Mittel und damit nicht an Budgetprozess (politischen Prozess) gebunden, einfacher Anmeldeprozess ▪ Grundsätzlich keine Begrenzung der Anzahl geförderter Busse ▪ Instrument ist offen für weitere Programme/Projekte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Förderbeitrag pro tCO₂ orientiert sich nicht an den Mehrkosten (Verhandlungsergebnis myclimate/KliK) ▪ Programm v.a. für Teilnehmer interessant, die schon eine hohe Zahlungsbereitschaft für die Umstellung der Flotte zeigen ▪ Keine Anrechnung der CO₂-Kompensation durch KTU möglich ▪ Keine Förderung von Ladeinfrastruktur
Kantonales Förderprogramm Energie Ladeinfrastruktur (Bsp. Bern)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusätzliche Mittel zur ordentlichen ÖV-Finanzierung im RPV und Ortsverkehr für Ladeinfrastruktur ▪ Orientierung an den anrechenbaren Investitionskosten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auf Ladeinfrastruktur begrenzt, keine Förderung zusätzlicher baulicher Massnahmen zur Installation oder elektrischem Anschluss ▪ Keine Anrechnung CO₂-Kompensation durch KTU oder Abtretung an andere Organisation
Kommunale Förderung Ladeinfrastruktur (Bsp. ewb)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusätzliche Mittel zur ordentlichen ÖV-Finanzierung von Ladeinfrastruktur v.a. im Ortsverkehr (Ökofonds) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auf Investitionskosten und örtlich beschränkt ▪ Finanzielle Ergiebigkeit fraglich ▪ Keine Finanzierung von Fahrzeugen
Kommunale Förderung Fahrzeuge + Ladeinfrastruktur (Bsp. ewz)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zusätzliche Mittel zur ordentlichen ÖV-Finanzierung v.a. Ortsverkehr (Stromsparfonds) ▪ Ladeinfrastruktur und Fahrzeuge ▪ Orientierung an den anrechenbaren Investitionskosten 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Auf Investitionskosten und örtlich beschränkt

Tabelle INFRAS.

Da der ÖV öffentlich bestellt und finanziert wird, stellt sich die grundsätzliche Frage, inwiefern es zusätzliche Fördermassnahmen braucht oder ob im Rahmen des Bestellprozesses (und auch im Rahmen der strategischen Zielsetzungen der i.d.R. öffentlichen Unternehmen) die Umstellung auf bzw. Durchdringung mit fossilfreien, energieeffizienten Fahrzeugen im ÖV gefördert werden kann. Den Kantonen, die die RPV-Bestellung koordinieren und oft im Ortsverkehr mitfinanzieren, kommt hierbei eine wichtige Rolle zu. Kantonale Strategien und Konzepte für einen fossilfreien, energieeffizienten ÖV können die Durchdringung fördern. Gleichzeitig müssen hierfür aber auch die entsprechenden finanziellen Mittel seitens Bund, Kantonen und Gemeinden zur Verfügung stehen.

Das RPV-Bestellverfahren und Qualitätsmesssystem RPV (als Basis für Zielvereinbarungen) berücksichtigt heute keine Umweltziele. Die Einführung eines nationalen Benchmarking-Systems für den gesamten bestellten öffentlichen Personenverkehr ist vorgesehen (Reform RPV). In diesem Rahmen könnten Umweltziele und ein entsprechendes Monitoring und Benchmarking aufgebaut werden. Diese würde die Begründung allfälliger Mehrkosten im Rahmen der Bestellung und Beschaffung erleichtern. Hierbei ist jedoch der Trade-off zu den Kompensationsprojekten zu berücksichtigen. Werden Vorgaben betreffend der Umweltstandards der zu beschaffenden Busse seitens der Besteller gemacht, kann das Kriterium der Zusätzlichkeit (Additionalität) im Rahmen von Kompensationsprojekten wie das Programm «Hybrid- und Elektrobus» von myclimate / KliK nicht mehr als nachgewiesen gelten. Dieses nationale Förderinstrument würde dementsprechend an Bedeutung verlieren.

Der grösste Fehlanreiz ist die bestehende Rückerstattung der Mineralölsteuer für die KTU, die eine indirekte finanzielle Förderung der Dieselbusse darstellt. Wird die Mineralölsteuer-rückerstattung für KTU abgeschafft und werden die Tarife beibehalten, steigt der Abgeltungsbedarf der Betreiber.

5.3. Blick ins Ausland

Im Rahmen des Projekts wurden

- der Europäische Rechtsrahmen zur Förderung sauberer Strassenfahrzeuge (Clean Vehicle Directive),
- verschiedene Fallstudien ausgewählter Länder sowie
- internationale Dokumente zu den Beschaffungs- und Finanzierungsoptionen (v.a. in Bezug auf elektrisch angetriebene Busse) analysiert.

5.3.1. Europäischer Rechtsrahmen (Clean Vehicle Directive)

Zur Förderung sauberer Strassenfahrzeuge wurde die Richtlinie 2009/33/EG¹³² erlassen. Öffentliche Auftraggeber¹³³ und Betreiber öffentlicher Personenverkehrsdienste im Rahmen eines öffentlichen Dienstleistungsauftrages¹³⁴ sollten beim Kauf von Personenkraftwagen, leichten und schweren Nutzfahrzeugen sowie Bussen die Energie- und Umweltauswirkungen, d.h. den Energieverbrauch, die CO₂-Emissionen und Emissionen von NO_x, Nichtmethan-Kohlenwasserstoffen und Partikeln, berücksichtigen. Zur Erfüllung wurden zwei Optionen zur Wahl gestellt:

- Festlegung entsprechender technischer Spezifikationen für die Leistung der Fahrzeuge, gemäss denen Beschaffungen getätigt werden oder
- Verwendung der Energie- und Umweltauswirkungen als Kauf- bzw. Zuschlagskriterien

Für die zweite Option definierte die Richtlinie eine Methode zur Berechnung der Betriebskosten der beschafften Fahrzeuge, die über die gesamte Lebensdauer anfallen in Bezug auf die Energie- und Umweltauswirkungen (Internalisierung externer Kosten).

Die Umsetzung in nationales Recht durch die Mitgliedstaaten sollte bis Dezember 2010 erfolgen, verzögerte sich jedoch.¹³⁵ Die Mehrheit der Mitgliedstaaten liessen beide Optionen zu. Vereinzelt wurde nur eine Option aus Gründen der Einfachheit und Kohärenz mit bestehenden nationalen Konzepten gewählt.

Im Ergebnis einer ex-post Evaluation 6 Jahre nach Inkrafttreten der Richtlinie 2009/33/EG wurde deren Wirkung als begrenzt beurteilt und eine Anpassung empfohlen (Brannigan et al. 2015). Im August 2019 ist die revidierte Richtlinie 2009/33/EG in Kraft getreten.¹³⁶ Je Mitgliedsstaat der EU sind wiederum Mindestziele in Form von Prozentsätzen sauberer Fahrzeuge der Klasse M (Fahrzeuge für die Personenbeförderung) oder N (Fahrzeuge für die Güterbeförderung) an der Gesamtzahl der Strassenfahrzeuge für die öffentliche Beschaffung (Kauf, Leasing, Miete, Ratenkauf) für zwei Zeitperioden (02.08.2021–31.12.2025 sowie 01.01.2026–31.12.2030) festgelegt. Mindestzielwerte sind differenziert für leichte und schwere Nutzfahrzeuge festgelegt, wobei Busse teilweise vom Anwendungsbereich ausgenommen sind. Für saubere leichte Nutzfahrzeuge liegen diese zwischen 38.5% und 17.6% und variieren nicht in den

¹³² Richtlinie 2009/33/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 über die Förderung sauberer Strassenfahrzeuge zur Unterstützung einer emissionsarmen Mobilität.

¹³³ Öffentliche Auftraggeber und Auftraggeber, die zur Anwendung der Vergabeverfahren gemäss den Richtlinien 2014/24/EU über die öffentliche Auftragsvergabe und 2014/25/EU über die Vergabe von Aufträgen durch Auftraggeber im Bereich der Wasser-, Energie- und Verkehrsversorgung sowie der Postdienste verpflichtet sind.

¹³⁴ Gemäss Verordnung (EG) 1370/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Oktober 2007 über öffentliche Personenverkehrsdienste auf Schiene und Strasse und zur Aufhebung der Verordnungen (EWG) Nr. 1191/69 und (EWG) Nr. 1107/70 des Rates.

¹³⁵ Bericht der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Anwendung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Strassenfahrzeuge, COM(2013) 214 final, Brüssel, 18. April 2013.

¹³⁶ Richtlinie (EU) 2019/1161 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Strassenfahrzeuge.

beiden Perioden, wobei die Emissionsgrenzwerte als Basis der Definition eines «sauberen» Fahrzeugs ab 01.01.2026 verschärft werden. Die Zielwerte für schwere Nutzfahrzeuge sind differenziert für Lkw und Busse und erhöhen sich in der Periode ab 01.01.2026. Für die betroffenen Busse gelten ab 2021 Mindestziele zwischen 24% (Rumänien) bis 45% (Österreich, Deutschland, Niederlande, UK). Diese erhöhen sich ab 2026 auf 33% bis 65%. Frankreich hat als erstes Land bereits nationale Rechtsvorschriften erlassen.¹³⁷

Die Europäische Kommission unterstützt die Entwicklung und die Marktdurchdringungen von sauberen Fahrzeugen durch gezielte Fördermassnahmen auf europäischer Ebene, z.B.:

- Connecting Europe Facility (CEF)¹³⁸: Durch dieses Finanzierungsinstrument der EU werden unter anderem Kredite für die Beschaffung von Elektrobussen und deren Ladeinfrastruktur ermöglicht oder auch die pionierhafte Installation von Wasserstofftankstellen co-finanziert (Models for Economic Hydrogen Refuelling Infrastructure MEHRLIN) (EU Kommission o.D., FuelCellBuses.eu o.D.).
- Trans-European Transport Networks (TEN-T): TEN-T ist ein Programm der Europäischen Union, das aus einer Vielzahl an Projekten besteht, die das Ziel verfolgen, den Zusammenhalt, die Verbindung und die Interoperabilität des transeuropäischen Verkehrsnetzes sowie den Zugang zu diesem Netz zu gewährleisten (INEA o.D.). Dabei werden u.a. auch Fördermittel für Ladestationen für Elektrobuse gesprochen.
- Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) ¹³⁹: Im Rahmen des EU-Forschungsprogramms «Horizon 2020» wird die Beschaffung von Wasserstoffbussen für Demonstrationsprojekte (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe JIVE/JIVE 2) durch FCH JU co-finanziert (FuelCellElectricBuses.eu o.D.).

5.3.2. Fallstudien Ausland

Im Rahmen der Bestandsaufnahme wurden fünf Länder mit deren Förderstrategien und -programmen auf nationaler und ausgewählte Beispiele auf regionaler bzw. kommunaler Ebene sowie weiteren nachfrageseitigen, finanziellen Fördermassnahmen in Bezug auf den öffentlichen Verkehr mit Bussen analysiert (vgl. Tabelle 24, separate Faktenblätter).

¹³⁷ Loi n° 2019-1428 du 24 décembre 2019 d'orientation des mobilités (1).

¹³⁸ CEF ist das EU-Finanzierungsinstrument für strategische Investitionen in Verkehr, Energie und digitale Infrastruktur. Die überwiegende Mehrheit der Fördermittel werden für Transportlösungen gesprochen (INEA, o.D.a).

¹³⁹ FCH JU ist eine öffentlich-private Partnerschaft der EU Kommission und Vertretern der Industrie und Forschung zu Wasserstofffahrzeugen.

Tabelle 24: Überblick Fallstudien Ausland

Land	Nationale Förderprogramme	Beispiele	Sonstiges
Deutschland	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sofortprogramm Saubere Luft 2017–2020 ▪ Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP II) 	Strategie der Berliner Verkehrsbetriebe (BVG)	Stromsteuer: Verminderte Stromsteuer für die Ladung von Elektrobussen
Frankreich	MoéBUS	Busse im öffentlichen Personennahverkehr in Paris: Komplett Umstellung der 4'700 Busse auf Elektro- und Biogasbusse (Finanzierung durch Green Bonds)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stromabgabe: Stark reduziert für TU des ÖV ▪ Einführung <i>zones à circulation restreinte (ZCR)</i>
England	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Green Bus Fund (2009–2015) ▪ Low Emission Bus Scheme (2015–2017) ▪ Ultra-Low Emission Bus Scheme (2018–2021) 	Auszahlung von 6 Pennies pro gefahrenem Kilometer von klimaschonenden Bussen (Bonus)	Definition von <i>Low Emission Bus Zones</i>
Niederlande	<ul style="list-style-type: none"> ▪ MIA (Environmental investment allowance) und Vamil (Random depreciation of environmental investments scheme) ▪ Förderprogramm «DKTI-Verkehr 2019» 	Nationales Abkommen zur Beschaffung emissionsfreier Busse (Bestuursakkoord Zero Emissie Regionaal Openbaar Vervoer Per Bus)	Grosse Unterstützung durch EU-Förderprogramme
Österreich	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Klimaschutzinitiative klimaktiv mobil ▪ Förderprogramm Zero Emission Mobility 	Holding Graz: move2zero	

ÖPNV: Öffentlicher Personennahverkehr; ÖV: Öffentlicher Verkehr; TU: Transportunternehmen

Tabelle INFRAS. Quellen: Siehe separate Faktenblätter.

Deutschland

Der Bund fördert die Elektromobilität (Anschaffung Fahrzeuge und Ladestationen) und die Nachrüstung von Dieselbussen (Sofortprogramm Saubere Luft) sowie den Einsatz von Brennstoffzellenfahrzeugen im ÖPNV (Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, NIP) massgeblich mit. Der Fokus liegt bei der Förderung der Investitionsmehrkosten (ggü. einem vergleichbaren Dieselbus Euro VI). Die Investitionsmehrkosten von Elektrobussen werden im Rahmen des Förderprogramms «Elektrifizierung des Verkehrs – Anschaffung von Elektrobussen im öffentlichen Personennahverkehr» des Sofortprogramms Saubere Luft beispielsweise mit bis zu 80% gefördert. Bei Plug-in-Hybrid-Bussen und Ladeinfrastruktur liegt diese Quote bei 40%.

Auch die Bundesländer haben eigene Förderprogramme v.a. im Bereich der Elektromobilität initiiert, wobei die Förderbeiträge insgesamt nicht die Maximalbeiträge gemäss der Förderprogramme des Bundes übersteigen dürfen. Die ausgewerteten Beispiele zeigen, dass aufgrund der höheren Förderquoten des Bundes gegenüber Programmen der Bundesländer die Förderung bevorzugt über Mittel des Bundes (ergänzt um Mittel aus EU-Programmen) erfolgen.

Die Förderlandschaft ist – auch aufgrund der verschiedenen Programme und Projektaufäufe und involvierten Bundesministerien und Gebietskörperschaften – sehr komplex und der grosse bürokratische Aufwand wird als nachteilig beurteilt. Gemäss einer Umfrage bei deutschen Kommunen sind nicht nur mangelnde Ressourcen (finanziell, personell) sondern auch fehlendes Know-how ein Hemmnis im Bereich Elektromobilität.

Beispiel Berliner Verkehrsbetriebe (BVG)

Die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) haben 2019 angekündigt ihren kompletten Busverkehr bis 2030 auf elektrische Fahrzeuge umstellen zu wollen. Im ersten Schritt wurde die Beschaffung von 225 Elektrobusen angekündigt. Hierbei werden die Investitionsmehrkosten im Vergleich zu konventionellen Dieselnissen komplett durch Fördergelder gedeckt. So wurden im Rahmen des «Sofortprogramms Sauber Luft 2017–2020» insgesamt 48 Mio. Euro vom Bund getragen. Hiervon hat das Bundesamt für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) 35 Mio. Euro beigesteuert, gestützt auf dem Programm zur «Förderung der Anschaffung von Elektrobusen im ÖPNV», und weitere rund 13 Mio. Euro wurden vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) durch das Förderprogramm «Elektromobilität» gewährt. Zusätzlich wurden auch Gelder vom Bundesland Berlin gesprochen.¹⁴⁰

Frankreich

Mit dem neuen und umfassenden Energiegesetz¹⁴¹ aus dem Jahr 2015 sind ambitionierte Ziele für eine Energiewende auch im öffentlichen Verkehrssektor festgelegt. Der Staat und seine öffentlichen Einrichtungen sind verpflichtet, bei der Erneuerung ihrer Fahrzeugflotte zu mindestens 50% Fahrzeuge mit geringen CO₂- und Luftschadstoffemissionen (emissionsarm, z.B. Elektrofahrzeuge) zu beschaffen. Die lokalen Behörden müssen sicherstellen, dass 20% ihrer Ersatzfahrzeuge emissionsarme Fahrzeuge sind. Alle ab 2025 neu zu beschaffenden Busse, die im ÖV eingesetzt werden, müssen emissionsarme Fahrzeuge sein. Zudem soll auch die Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge stark ausgebaut werden.

Für die finanzielle Förderung zusätzlich zur regulären ÖV-Finanzierung existieren vergleichsweise wenig Förderprogramme. Durch das Förderprogramm MoéBus (Teil des Systems

¹⁴⁰ BMVI 2019: BMVI und BMU fördern Elektrobusse in Berlin, <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2019/023-scheuer-bmvi-bmu-elektrobusse.html> abgerufen am 23.03.2020.

¹⁴¹ Loi de transition énergétique pour la croissance verte.

Certificats d’Economies d’Energie) werden die Anschaffung von Elektrobussen und deren Ladinfrastruktur mit insgesamt 36 Mio. Euro gefördert.¹⁴² Ziel ist es, im Rahmen dieses Programms in den Jahren 2019 und 2020 die Beschaffung von 500 Elektrobussen (mit bis zu 200'000 Euro für einen Gelenkbus) und die Umstellung von 50 Busdepots finanziell zu unterstützen. Wie das Beispiel aus Paris (vgl. Box) zeigt, werden aber auch andere Finanzierungsinstrumente genutzt.

Beispiel Régie Autonome des Transports Parisiens (RATP) – bus2025

Der staatliche Betreiber des öffentlichen Personennahverkehrs in Paris – Régie Autonome des Transports Parisiens (RATP) – hat sich im Jahr 2014 verpflichtet, bis im Jahr 2025 die gesamte Flotte von 4'700 Bussen umweltfreundlich zu betreiben und dementsprechend auch ihre Busdepots umzurüsten. So sollen rund zwei Drittel der Busse elektrisch angetrieben werden und rund ein Drittel durch Biogas.¹⁴³ Die Umsetzung soll in drei Phasen erfolgen, wobei die Phase 1 und 2 abgeschlossen und ab 2018 ein grosser Roll-out geplant ist.

Dieses ambitionierte Projekt soll hauptsächlich durch sogenannte Green Bonds finanziert werden, d.h. Finanzanleihen, die für vorab definierte Nachhaltigkeitsprojekte ausgegeben werden.¹⁴⁴ RATP hat im Jahr 2019 Green Bonds im Umfang von 500 Mio. Euro und einer Maturität von 10 Jahren emittiert.¹⁴⁵ Diese finanziellen Mittel sollen unter anderem für die Umrüstung der Busflotte eingesetzt werden.

England

Seit 2009 erhalten Busunternehmen im ÖV nationale Förderungen für den Kauf von Bussen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Das Department for Transport initiierte inzwischen drei Förderprogramme zur Förderung von umweltfreundlicheren Bussen («Green Bus Fund», «Low Emission Bus Scheme», «Ultra-Low Emission Bus Scheme»). In der 1. Runde des «Green Bus Fund» (2009) wurden die gesamten Investitionsmehrkosten gegenüber einem Referenzfahrzeug ausbezahlt. Die Förderquoten wurden in den weiteren Runden sukzessive reduziert und lagen 2013 bei 50% bzw. bei Elektrobussen bei 80% der Mehrkosten gegenüber dem Referenzfahrzeug. Im folgenden Programm «Low Emission Bus Scheme» orientierte sich die Höhe der Förderung an den eingesparten Treibhausgasemissionen («Well-to-Wheel»). Im aktuell laufenden «Ultra-Low Emission Scheme» werden maximal 50% der Investitionsmehrkosten (mind. 30% Reduktion Treibhausgasemissionen ggü. Referenzfahrzeug Euro VI) bzw. 75% bei emissionsfreien Bussen und Infrastruktur gefördert.

Zusätzlich zu den kontinuierlich fortgeführten Förderprogrammen für Busse werden verschiedene ergänzende Massnahmen zur Förderung getroffen. Klimaschonende Busse von Bus-

¹⁴² http://www.avery-france.org/Site/Article/?article_id=7621

¹⁴³ RATP 2018: bus2025 – The ambitious RATP plan for a 100% ecologically-friendly fleet, <https://www.ratp.fr/sites/default/files/inline-files/RATP%202025%20Bus%20Plan%20Press%20Kit.pdf>, 2018.

¹⁴⁴ RATP 2017: RATP Green Bond Framework, <https://www.ratp.fr/sites/default/files/inline-files/RATP%20Green%20Bond%20Framework%20version%20finale%2025042018.pdf>, Mai 2017.

¹⁴⁵ <https://www.ratp.fr/en/groupe-ratp/newsroom/corporate/second-issuing-ratp-green-bonds-outstanding-success-0>

unternehmen, die abgeltungsberechtigten ÖPNV anbieten, erhalten einen zusätzlichen Incentive von 6 Pence/Kilometer im Rahmen der Treibstoffförderung (vgl. folgende Box). Ordnungspolitische Massnahmen in Städten wie London (z.B. Low Emission Bus Zones) wurden ergänzend zu den finanziellen Förderungen eingeführt.

Finanzieller Incentive im Rahmen des Bus Service Operators Grant (BSOG) des Department for Transport¹⁴⁶

Im Rahmen des BSOG erhalten Busunternehmen, die im abgeltungsberechtigten ÖPNV-Leistungen anbieten, unter bestimmten Voraussetzungen Rückerstattungen pro Liter Treibstoff. In diesem Zusammenhang erhalten Unternehmen für klimaschonende Busse einen zusätzlichen finanziellen Anreiz von 6 Pence/Kilometer (umgerechnet rund 7 Rp./km). Busse gelten als klimaschonend, wenn sie ein Zertifikat besitzen, welches nachweist, dass diese Busse 30% weniger Treibhausgase emittieren verglichen mit einem durchschnittlichen Dieselbus der Klasse Euro III.

Niederlande

Im Jahr 2019 verabschiedete die Regierung ein nationales Klimaabkommen («Klimaatakkord»). Dieses legt fest, dass die nationalen CO₂-Emissionen bis 2030 um 49% verglichen mit den Emissionen von 1990 zu reduzieren sind. Im Bereich Mobilität wurden sektorspezifische Ziele formuliert. Bis 2050 soll der gesamte Verkehrssektor in den Niederlanden emissionsfrei sein.

Zur Förderung von Massnahmen zur Erreichung der Klimaziele sind einerseits Steuerabzüge bzw. gesonderte Abschreibungsregeln für umweltfreundliche Investitionen (Environmental investment deduction MIA, Arbitrary depreciation of environmental investments Vamil). Mit den Programmen sollen Unternehmen Vorteile betreffend Liquidität und Zinsen erhalten. Andererseits werden Innovations- und Demonstrationsprojekte für noch nicht marktreife Fahrzeuge im Verkehr (Demonstratie klimaattechnologieën en -innovaties in transport, DKTi-transport) finanziell gefördert. Der Markthochlauf wird nicht direkt finanziell gefördert.

Die Finanzierung mit Mitteln aus EU-Projekten hat eine vergleichsweise grosse Bedeutung in den Niederlanden. Beispielsweise vergab die European Investment Bank (EIB) im Jahr 2019 einen Kredit in der Höhe von 115 Mio. Euro an den Betreiber des öffentlichen Verkehrs der Region Rotterdam (RTE), um u.a. die Beschaffung von 105 Elektrobussen und 103 Diesel-Hybridbussen und die Installation der Ladeinfrastruktur für diese Busse in den Depots (32 Ladestationen) sowie entlang der Buslinien (17 Ladestationen) zu finanzieren. Möglich gemacht haben diese Subventionen der EIB, die CEF und die EFSI.¹⁴⁷

Die Niederlande hatte bereits 2016 ein Abkommen zu Beschaffung von emissionsfreien Bussen verabschiedet (vgl. Box).

¹⁴⁶ DfT 2019: Bus Service Operators Grant: guidance for commercial transport operators, <https://www.gov.uk/government/publications/bus-service-operators-grant-guidance-for-commercial-transport-operators/bus-service-operators-grant-guidance-for-commercial-transport-operators>, 23. September 2019.

¹⁴⁷ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_5952

Bestuursakkoord Zero Emissie Regionaal Openbaar Vervoer Per Bus (BAZEB)

Im Jahr 2016 wurde ein Abkommen zur Beschaffung von emissionsfreien Bussen zwischen dem niederländischen Ministerium für Infrastruktur und Umwelt, der Vereinigung der niederländischen Provinzen und den Metropolregionen Rotterdam/Den Haag und Amsterdam unterzeichnet. Es legt fest, dass ab 2025 nur noch emissionsfreie Busse angeschafft werden und bis 2030 alle Busse des öffentlichen Verkehrs emissionsfrei sein sollen. Zudem sollen der Strom für die Elektrobusse und die Energie für die Herstellung von Wasserstoff bis spätestens 2025 vollständig aus Sonnenkollektoren und Windturbinen aus der Region stammen.

Österreich

Zentrales Ziel der Bundesregierung ist die Reduktion von Treibhausgasemissionen, um bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität zu erreichen. 2018 wurde die Klima- und Energiestrategie «#mission 2030» veröffentlicht.¹⁴⁸ Um die Ziele zu erreichen, werden Massnahmen im Rahmen verschiedener nationaler Programme («klimaaktiv mobil», «Zero Emission Mobility») gefördert. Für die Entwicklung, Erprobung und Beschaffung von alternativ angetriebenen Bussen im ÖV werden Fördermittel des Bundes gezahlt. Der Fokus liegt hierbei auf die Förderung der Investitionsmehrkosten. Im aktuell laufenden Förderprogramm «E-Mobilitätsmanagement, E-Flotten und E-Logistik» im Rahmen von «klimaaktiv mobil» werden bis zu 30% der Anschaffungskosten gefördert. Bei F&E-Vorhaben im Rahmen von «Zero Emission Mobility» sind höhere Förderquoten möglich. Zudem soll auch die Marktdurchdringung aus dem Klima- und Energiefonds gefördert werden.

Beispiel Holding Graz: move2zero

Die österreichische Stadt Graz beabsichtigt mit ihrem Verkehrsprojekt move2zero die vollständige Dekarbonisierung ihres Bussystems. Hiermit sollen nicht nur die Treibhausgasemissionen reduziert, sondern auch die städtische Luftqualität verbessert werden. Im Rahmen des österreichischen Forschungs- und Demonstrationsprogramms «Zero Emission Mobility» wurden hierfür in einem ersten Schritt Fördermittel im Umfang von 3.3 Mio. Euro gesprochen für die Beschaffung von sieben Elektrobussen und sieben Bussen mit Brennstoffzellenantrieb. Diese Busse sollen im Demonstrationsbetrieb von 2019 bis 2023 zwei komplette Buslinien bedienen.¹⁴⁹

5.3.3. Beschaffungsoptionen und Finanzierungsmöglichkeiten

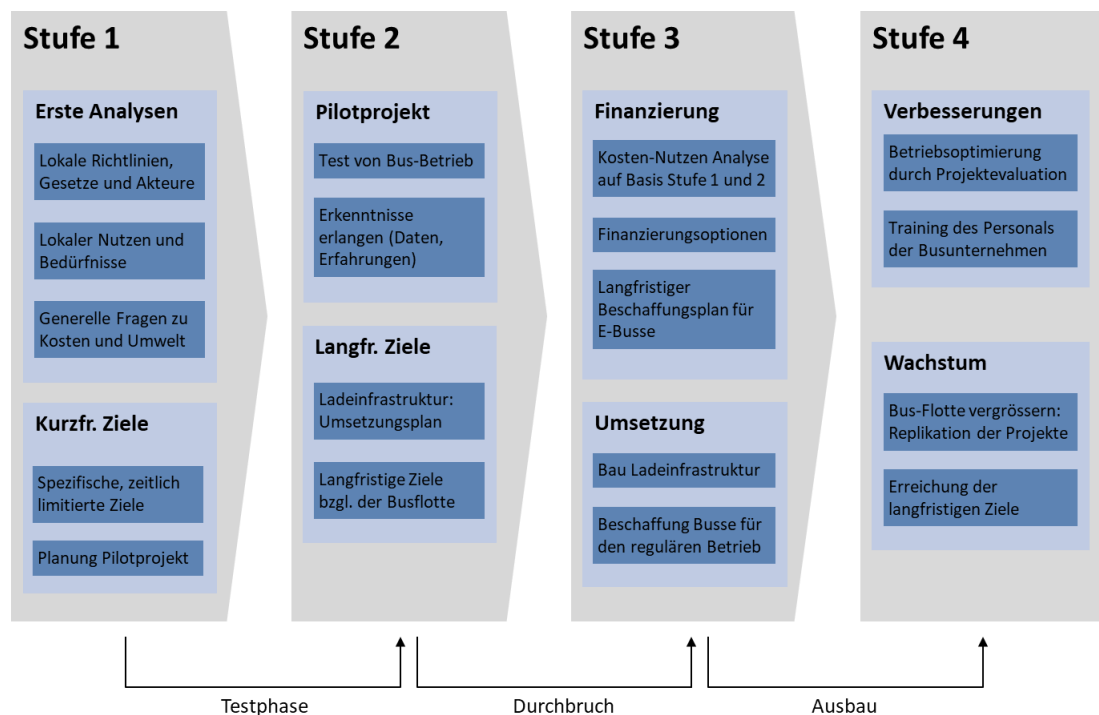
Ergänzend zu den Fallstudien haben wir internationale Literatur zu den (theoretischen) Beschaffungsoptionen und Finanzierungsmöglichkeiten ausgewertet, um mögliche alternative An-

¹⁴⁸ BMNT und BMVIT 2018: #mission2030 – Die österreichische Klima- und Energiestrategie, https://www.bundeskanzleramt.gv.at/dam/jcr:903d5cf5-c3ac-47b6-871c-c83eae34b273/20_18_beilagen_nb.pdf, abgerufen am 23.03.2020.

¹⁴⁹ Klima- und Energiefonds o.D.: move2zero, <https://www.klimafonds.gv.at/unsere-themen/mobilitaetswende/leuchttuermer-elektromobilitaet/move2zero/>, abgerufen am 23.03.2020.

sätze aufzuzeigen, die nicht allein die Finanzierung sondern generell Beschaffung thematisieren. Hierbei ist zu beachten, dass die Finanzierungsoptionen nur ein Teil des Einführungsprozesses und im Kontext zu sehen sind (Abbildung 36).

Abbildung 36: Einführungsprozess Elektrobusse



Grafik INFRAS. Quelle: angelehnt an WRI 2019a.

In Stufe 1 sollte überprüft werden, ob die lokalen Voraussetzungen für die Einführung von E-Bussen gegeben sind und ein Pilotprojekt initiiert werden. Die zweite Stufe umfasst vor allem die Umsetzung des Pilotprojekts. Zusätzlich sollten bei der Errichtung der Ladeinfrastruktur des Pilotprojekts bereits zukünftige Entwicklungen berücksichtigt werden. Somit ist es hilfreich, bereits langfristige Ziele zur Busflotte zu definieren und einen langfristigen Umsetzungsplan zur Ladeinfrastruktur zu entwerfen. Stufe 3 markiert den Durchbruch der Technologie. Generell sollte bei den Finanzierungsüberlegungen die gesamte Lebensdauer der Elektrobusse berücksichtigt werden. Auf dieser Grundlage kann ein langfristiger Beschaffungsplan ausgearbeitet werden. In Stufe 4 beabsichtigt den grossflächigen Betrieb von elektrischen Bussen.

Finanzielle Hindernisse

Oftmals fokussieren Beschaffungspraktiken von Behörden und Transportunternehmen in erster Linie auf möglichst tiefe Beschaffungskosten und tiefe Risiken und vernachlässigen den gesamten Lebenszyklus der Busse. Auch werden in den traditionellen Beschaffungspraktiken die Verantwortlichkeiten für neuartige Aufgaben, wie beispielsweise die Elektrizitätsversorgung oder die Finanzierung und der Unterhalt des Ladenetzwerks, oft nur mangelhaft bestimmt.

Die Einführung fossilfreier Busse in der Fläche bedarf grosser Investitionssummen. Oftmals beschränken sich die Finanzierungsoptionen auf einmalige staatliche Subventionen oder zeitlich limitierte Vorteilspreise von Busproduzenten für die Umsetzung kleiner Projekte (WRI 2019b). Wird keine langfristige, fortlaufende Finanzierung sichergestellt, besteht das Risiko, dass die Beschaffung fossilfreier Busse nicht über die Phase von Pilotprojekten hinausgeht (vgl. Beispiel Madrid).

Beispiel Madrid: Schwierigkeiten Ausbau E-Busflotte

In Madrid wurden bereits im Jahr 2007 18 E-Minibusse im Tourismussektor eingesetzt. Jedoch hat es die Stadt nicht geschafft, darauf aufbauend die E-Busflotte aufzustocken. Erst 2018 wurden weitere Elektrobusse beschafft, jedoch lediglich im Rahmen eines Pilotprojekts. Gemäss WRI (2019b) kann das Scheitern Madrids, über die Phase des Pilotprojekts hinauszugehen, an zwei Hauptgründen festgemacht werden. Während die Stadt grosszügige einmalige Subventionen erhielt für die Pilotprojekte, bestehe kein skalierbares, langfristiges Finanzierungsprogramm. Der zweite Grund sei die konservative, risikoaverse Haltung der Entscheidungsträger. Diese wollen lediglich schrittweise Elektrobusse einführen und gleichzeitig technologische Fortschritte abwarten. Somit hat man sich gegen eine grosse Beschaffung von E-Bussen entschieden.

Beschaffungsoptionen

Zusätzlich zur Finanzierung sind auch verschiedene Beschaffungsoptionen denkbar (Tabelle 25), die betreffend der Aufteilung des Technologierisikos relevant sein können.

Tabelle 25: Beschaffungsoptionen für Elektrobusse

Option	Beschreibung
Barkauf	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bezahlung vollständiger Kaufpreis im Voraus ▪ Besitz durch Betreiber, der das Technologierisiko trägt ▪ Subventionsmöglichkeit mittels öffentlicher Gelder
Kauf per Kredit	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Teil der Kosten im Voraus bezahlt, Rest ist geliehen ▪ Besitz durch Betreiber ▪ Möglichkeit günstige Kreditbedingungen anzubieten ▪ Schafft Investitionsmöglichkeiten in umweltfreundliche Projekte Kreditgeber trägt Kreditrisiko, was die Kreditkosten erhöhen kann
Finanzierungsleasing	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mietzahlungen für die Fahrzeuge und/oder die Infrastruktur für festgelegten Zeitraum durch Betreiber ▪ Mietdauer nahe der Lebenserwartung des Mietobjekts ▪ Besitz durch Vermieter

Option	Beschreibung
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Oft Kaufoption für Betreiber am Ende der Miete ▪ Kaufoption setzt Anreize zu schonender Nutzung der Mietobjekte ▪ Potenzielle Steuer- und Mehrwertsteuervorteile ▪ Angebot teils nur für Lokalregierungen mit hoher Kreditwürdigkeit
Betreiber-Leasing	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Betreiber zahlt für die Nutzung eines Busses für einen festgelegten Zeitraum ▪ Besitz durch Betreiber aber kein Eigentum ▪ Oft Kaufoption für Betreiber nach Ende der Mietdauer ▪ Verringert finanzielle Last des Betreibers ▪ Verringert Leistungsrisiken neuer Technologien für den Betreiber ▪ Kaufoption setzt Anreize zu schonender Nutzung ▪ Hersteller trägt das operationelle Risiko ▪ Vergabe v.a. an finanzstarke Betreiber ▪ Neue buchhalterische Praktiken erschweren diese Art (Vermögenswert verbleibt in Bilanz)
Komponenten-Leasing	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Miete von Teilkomponenten, v.a. Batterien ▪ Hersteller besitzt normalerweise die Batterie während der Mietdauer und ersetzt diese, wenn nötig ▪ Verringert finanzielle Last des Betreibers ▪ Verringert Leistungsrisiken neuer Technologien für den Betreiber ▪ Hersteller trägt Technologierisiko

Tabelle INFRAS. Quellen: ICCT (2017), WRI (2019c)

Auf Grundlage internationaler Studien lassen sich vier Kategorien von Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten zusammenfassen. (Tabelle 26).

Tabelle 26: Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten Elektrobusse international

Kategorie	Unterkategorie	Beschreibung	Beispiel
Subventionen und geldwerte Vorteile	Subvention Investitionsausgaben	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aus öffentlichen oder privaten Mitteln ▪ Überwindung der hohen Vorlaufkosten für Elektrobusse und deren Infrastruktur 	Green Bus Fund, England
	Subvention für Forschung, Entwicklung und Testbetrieb	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aus öffentlichen oder privaten Mitteln ▪ Technologieentwicklung, Senkung der Kosten und Demonstrations- und Pilotprojekte 	Zero Emission Urban Bus System (ZeEUS), Europäische Union
	Subvention Betriebsausgaben	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Betriebsunsicherheit neuer Technologien 	Berlin, Deutschland
	Staatliche Landzuteilung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzungsmöglichkeit von Land ▪ Insbesondere wertvoll für Ladeinfrastruktur 	Pomona Valley, USA
Darlehen und Anleihen	Vorzugsdarlehen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ V.a. für private Transportunternehmen 	Curitiba, Brasilien

Kategorie	Unterkategorie	Beschreibung	Beispiel
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorteilhafte Kreditkonditionen (tiefere Zinsen, längere Rückzahlfristen) ▪ Normalerweise zur Verfügung gestellt durch nationale und internationale Entwicklungsbanken und -agenturen 	
	Green Bonds	<ul style="list-style-type: none"> ▪ V.a. für öffentliche Transportunternehmen ▪ Vorteilhafte Kreditkonditionen (tiefere Zinsen, längere Rückzahlfristen) ▪ Anleihen, dessen Gelder zu min. 95% umweltfreundliche Projekte finanzieren müssen 	RATP Paris, Frankreich
Steuervergünstigungen	Reduktion Unternehmenssteuern	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Umsatz-/Gewinnsteuern ▪ Finanzielle Anreize für private Busunternehmen 	Shenzhen, China
	Verzicht/Reduktion Mehrwertsteuer	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Finanzielle Anreize für private Produzenten und Busbetriebe 	Personentransportunternehmen Frankreich, Deutschland, Niederlande etc.
	Verzicht Importsteuern	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduziert Preise von importierten Elektrobussen ▪ Schafft finanziellen Vorteil ggü. konventionellen Dieseln 	Bogotá, Kolumbien
Sonstige Vergütungen	Strompreisvergütung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Freiwillig vom Energieversorgungsunternehmen oder aufgrund von Regulationen ▪ Senkt die Betriebskosten 	Deutsche Verkehrsunternehmen
	Verzicht/Reduktion Umweltabgabe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verminderte Abgaben auf den Stromverbrauch ▪ Senkt die Betriebskosten 	London, UK

Tabelle INFRAS. Quelle: WRI (2019c), Li, Castellanos and Maassen (2018)

5.3.4. Zwischenfazit

- Gemäss Europäischen Rechtsrahmen (Clean Vehicle Directive) wird die Förderung alternativ angetriebener Fahrzeuge einerseits durch Beschaffungsvorgaben (Mindestanteile sauberer Fahrzeuge an den gesamt beschafften Fahrzeugen) ergänzt mit entsprechenden finanziellen Fördermassnahmen angestrebt. Die angepasste Richtlinie wurde bisher in Frankreich in nationales Recht implementiert.
- Die gewählten Fallstudien zeigen, dass die finanziellen Fördermassnahmen sehr unterschiedlich ausgestaltet sind und sich die nationalen Förderstrategien unterscheiden. Beim Ver-

gleich mit dem Ausland sind die Fördermassnahmen jeweils vor dem Hintergrund der regulatorischen Rahmenbedingungen und Finanzierungsverantwortlichkeiten im öffentlichen Personenverkehr sowie allfälligen ergänzenden Massnahmen zu betrachten.

- In Deutschland und Grossbritannien werden im Rahmen von nationalen Förderprogrammen die Marktdurchdringung mit fossilfreien Bussen massgeblich finanziell gefördert. Vor allem zu Beginn werden sehr hohe Förderquoten in Bezug auf die Investitionsmehrkosten finanziert und können – wie in England – sukzessive gesenkt werden. Aktuell beträgt die Förderquote in Deutschland 40% (Plug-in-Hybrid-Busse und Ladeinfrastruktur) bzw. 80% (Elektrobus) der Investitionsmehrkosten. In England orientiert sich der Förderbeitrag inzwischen sowohl an den Investitionsmehrkosten als auch der reduzierten Menge CO₂.
- Sektorspezifische Ziele gelten in den Niederlanden und Frankreich. Mit Mindestvorgaben für die Beschaffung neuer Fahrzeuge wird die Marktdurchdringung gesetzlich festgelegt.
- Ordnungspolitische Massnahmen (Umweltzonen für Busse) wie in Frankreich und Grossbritannien können die Marktdurchdringung ergänzend fördern.

6. Synthese

6.1. Potenzial für fossilfreie Busse und Mehrkosten

Wie in Kapitel 4.8 ausgeführt stehen Batteriebusse als fossilfreie Antriebsoptionen für den Ersatz der Dieselbusse aus einer Gesamtsicht bezüglich Kosten und Umweltnutzen im Vordergrund.

Maximales Potenzial für fossilfreie Batteriebusse

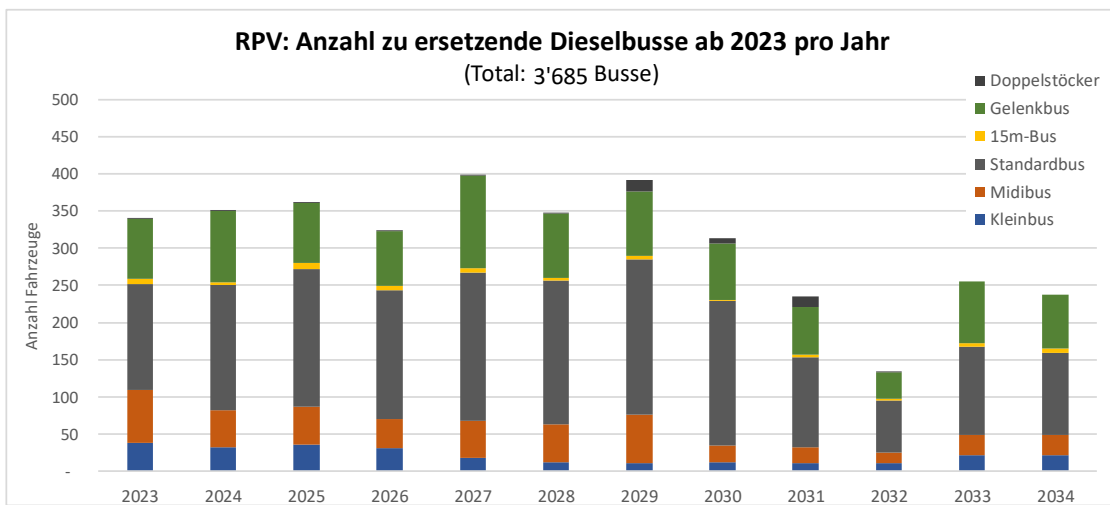
Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen, wie viele Busse in den nächsten Jahren im Regionalen Personenverkehr und im Ortsverkehr zu ersetzen sind. Hierzu wurden folgende Annahmen getroffen:

- Aus der TU-Umfrage im Rahmen der Bestandsanalyse lassen sich 36% der Dieselbusse nicht eindeutig den Sparten «RPV» und «Ortsverkehr» zuscheiden (vgl. Kapitel 2.2). Dieser Anteil wird mit dem pragmatisch angenommenen Verhältnis 60:40 auf die beiden Sparten Ortsverkehr und RPV aufgeteilt.
- Gemäss Angaben der TU zur Inbetriebnahme und (buchhalterischen) Abschreibedauer hätten rund 800 Busse in den Jahren 2012–2020 ersetzt werden sollen (vgl. Kapitel 2.2, Abbildung 7). Hier gehen wir davon aus, dass diese Busse, welche offensichtlich über ihre buchhalterische Abschreibungsdauer eingesetzt werden, in den nächsten 10 Jahren ersetzt werden (lineare Verteilung angenommen). Bei diesen Fahrzeugen aus der Periode 2012-2020 ist es gut möglich, dass nicht alle Busse tatsächlich ersetzt werden, beispielsweise, weil sie nur noch als Reservefahrzeuge für den Notfall vorgehalten werden. Aufgrund von weiteren Angebotsausbauten ist aber auch wahrscheinlich, dass zusätzliche Busse beschafft werden. Hier gehen wir pragmatisch davon aus, dass sich diese Effekte die Waage halten.
- Weiter nehmen wir an, dass von den in den Jahren 2021 und 2022 zu ersetzenden Bussen die Hälfte bereits Potenzial für einen Ersatz durch Batteriebusse ab 2023 (früher ist aufgrund Beschaffungs-/Bestellverfahren nicht möglich) darstellen. Auch hier gehen wir davon aus, dass das über mehrere Jahre verteilt erfolgt. Die andere Hälfte wird entsprechend nochmals durch Diesel- bzw. Diesel-Hybrid-Busse ersetzt, die dann 12 Jahre später, also im Horizont 2033/2034 weiteres Potenzial für den Ersatz durch Batteriebusse darstellt.

Mit diesen Annahmen resultiert in den nächsten rund 15 Jahren ein maximales Potenzial für Batteriebusse im Regionalverkehr von ca. 3'700 Fahrzeugen (bis zu 400 Busse pro Jahr) und im Ortsverkehr von ca. 1'800 Fahrzeugen (100–200 Busse pro Jahr). **Rein technisch wäre es möglich, dieses gesamte Potenzial zu realisieren.** Wie die Auswirkungsanalyse zu den Fallbeispiele-

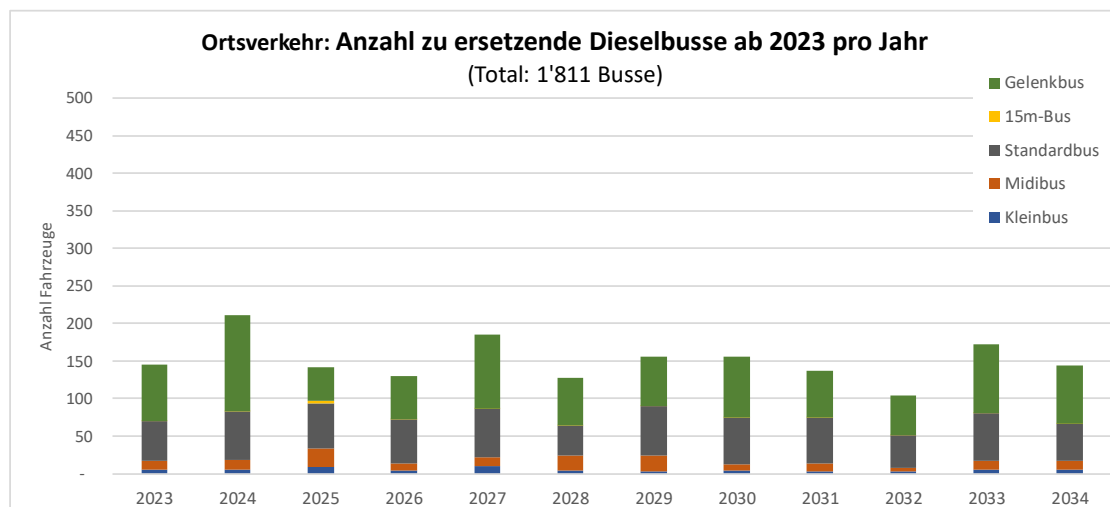
len jedoch zeigen, sind die Batteriebusoptionen kurzfristig noch vergleichsweise teuer. Sie werden deshalb kurzfristig noch in vielen Einsatzfeldern als nicht zweckmässig beurteilt, weil die Fahrzeuge und Batterien generell noch teuer sind und aus betrieblichen Gründen zusätzliche Fahrzeuge erforderlich sind (aufgrund noch zu geringer Reichweiten) oder zusätzliche Fahrpersonalkosten (ungenügende Wendezeiten am Linienende zum Nachladen) entstehen.

Abbildung 37: Maximales Potenzial für Dieselbusersatz durch Batteriebusse im RPV



Grafik INFRAS. Quelle: TU-Umfrage 2020, Annahmen INFRAS

Abbildung 38: Maximales Potenzial für Dieselbusersatz durch Batteriebusse im Ortsverkehr

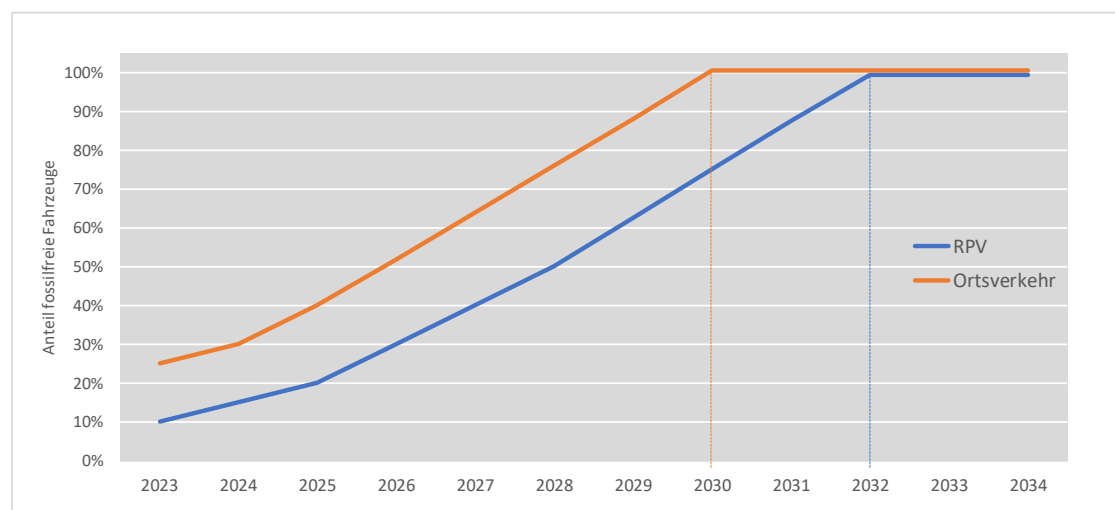


Grafik INFRAS. Quelle: TU-Umfrage 2020, Annahmen INFRAS

Realistisches Potenzial für fossilfreie Batteriebusse

Weil aufgrund der aktuellen Rahmenbedingungen Batteriebusse kurzfristig noch teuer sind (u.a. hohe Fahrzeugbeschaffungskosten, Aufbau der Ladeinfrastruktur, betriebliche Ineffizienzen als Folge noch ungenügender Energiespeicherung), sollen aus Kosten-Nutzen-Überlegungen bei den anstehenden Busersatzbeschaffungen in den nächsten Jahren noch nicht sämtliche Dieselbusse durch Batteriebusse ersetzt werden. Deshalb wurde ein – u.a. in Anlehnung an aktuelle E-Busstrategien von Transportunternehmen – «realistisches» Szenario für die Umstellung von Diesel- auf Batteriebusse definiert. Dieses Szenario wurde für den Orts- und Regionalverkehr unterschiedlich angesetzt mit der Überlegung, dass die Umstellung im Ortsverkehr schneller verlaufen wird als im RPV, weil im Orts- bzw. Agglomerationsverkehr aufgrund kürzerer Linien, i.d.R. wenig anspruchsvoller Topographie und teilweise bereits bestehender Oberleitungsinfrastruktur bessere Voraussetzungen bestehen. Zudem Die folgende Grafik zeigt, welche Annahmen bei diesem sog. Szenario «realistisch» in Bezug auf die Anteile, welche bei den anstehenden Busersatzbeschaffungen durch Batteriebusse ersetzt werden, unterstellt sind. Beim Ortsverkehr gehen wir bereits kurzfristig von Anteilen zwischen 25% bis 50% aus, beim RPV von 10% bis 30%. Bei diesem Szenario werden v.a. grössere Transportunternehmen, welche bereits Pilotversuche mit Batteriebussen durchführen und E-Bus-Strategien formuliert haben, aber auch kleinere, innovative TUs mitziehen. Beim Ortsverkehr werden demnach ab ca. 2030 sämtliche Ersatzbeschaffungen durch Batteriebusse erfolgen, beim Regionalverkehr zwei Jahre später ca. im Jahr 2032.

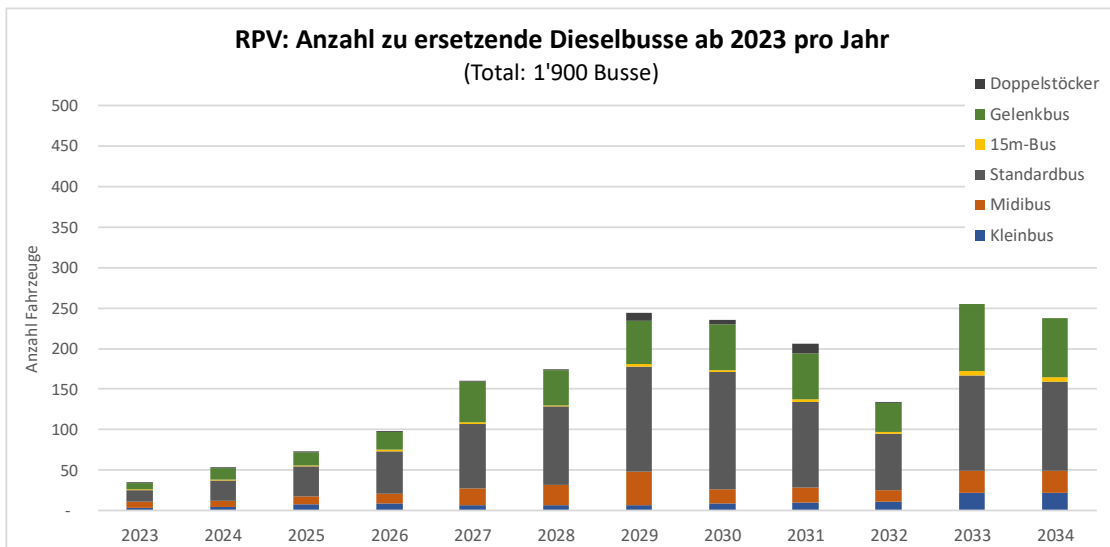
Abbildung 39: Anteil fossilfreie Batteriebusse am Total zu ersetzender Diesel-Busse je Jahr im Szenario "realistisch"



Grafik INFRAS. Quelle: Eigene Annahmen

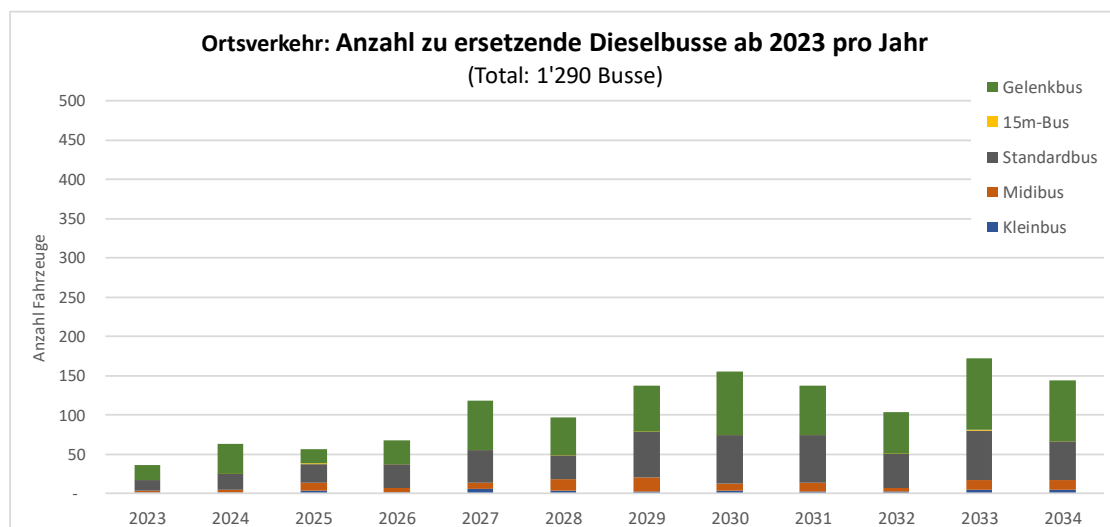
Die folgenden Grafiken zeigen die Grössenordnung der Anzahl jährlich zu ersetzender Dieselbusse durch Batteriebusse gemäss diesen Annahmen. Zwischen 2023 und 2034 wären dies im RPV 1'900 Fahrzeuge oder rund 50%, im Ortsverkehr knapp 1'300 Fahrzeuge oder rund 70% (vgl. Abbildung 40 und Abbildung 41).

Abbildung 40: Realistisches Potenzial für Batteriebusse im Regionalen Personenverkehr (RPV)



Grafik INFRAS. Quelle: TU-Umfrage 2020, Annahmen INFRAS

Abbildung 41: Realistisches Potenzial für Batteriebusse im Ortsverkehr



Grafik INFRAS. Quelle: TU-Umfrage 2020, Annahmen INFRAS

Mehrkosten fossilfreier Batteriebusse gegenüber Dieselbussen

Die Abschätzung der jährlichen Mehrkosten für die beiden Szenarien «maximales Potenzial» und «realistisches Potenzial» erfolgt auf folgendem Ansatz:

- Basis bilden die Potenziale der zu ersetzenden Busse pro Jahr (siehe oben).
- Die (relativen) Mehrkosten je Option und Zeithorizont folgen aus der Auswirkungsanalyse für die Fallbeispiele (vgl. Kapitel 4.3).
- Für die verschiedenen Batteriebusoptionen (Batterietrolleybus, Gelegenheitslader statisch und Depotlader) werden Annahmen getroffen, wie viele Busse durch welche Option ersetzt werden (vgl. Annex A8).
 - Beim Szenario «Maximales Potenzial» wird angenommen, dass kurz-/mittelfristig ein gewisser Teil der Fahrzeuge unter noch nicht idealen Voraussetzungen zum Einsatz kommen (beim Batterietrolleybus grösserer Anteil neuer Oberleitung nötig, beim Gelegenheitslader statisch zusätzliche Umläufe und beim Depotlader zusätzliche Busse), weil realistischerweise für die verschiedenen Optionen nicht genügend ideale Einsatzmöglichkeiten bestehen.
 - Das Szenario «realistisches Potenzial» hingegen nimmt Rücksicht auf ideale Einsatzbedingungen, welche sich positiv auf die Kosten auswirken.
- Daraus lassen sich über die drei Batteriebus-Optionen durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug und Zeithorizont approximativ ermitteln.
- Kostenseitig bilden die heutigen jährlichen Vollkosten gemäss ordentlicher Finanzierung bzw. Bestellverfahren die Grundlagen.
- Die Hochrechnung auf die Schweiz erfolgt proportional zu den pro Jahr zu ersetzenden Fahrzeugen gemäss den beiden Szenarien, differenziert nach Regional- und Ortsverkehr.

Die folgende Abbildung 42 zeigt die für den Regionalverkehr und den Ortsverkehr resultierenden jährlichen Mehrkosten für die beiden Szenarien «maximal» und «realistisch» unter den aktuellen Rahmenbedingungen mit Mineralölsteuer-Rückerstattung. Diese Basisrechnung geht bei den Batterie- und Brennstoffzellenbussen von einer Lebensdauer der Fahrzeuge von 12 Jahren (wie bei Diesel-, Biodiesel- und Biogasbussen) und von einer Lebensdauer der Batterien von 6 Jahren aus.

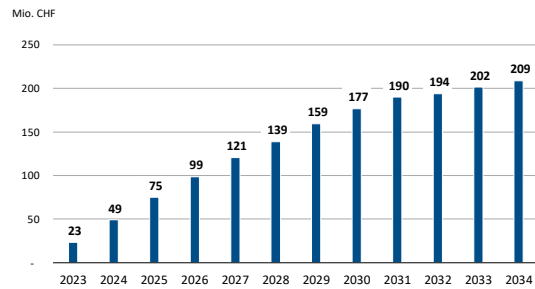
Im Regionalverkehr wären beim Szenario «realistisch» im Jahre 2034 ca. 50% der Flotte fossilfrei, beim Ortsverkehr wären es im selben Zeithorizont ca. 70%.

Abbildung 42: Jährliche Mehrkosten bei Umstellung von Dieselnbussen auf Batteriebusse – Basisrechnung (Grob-schätzung mit MinöSt-Rückerstattung)

Basisrechnung mit 12 Jahre Lebensdauer Fahrzeuge (alle Antriebsoptionen) und 6 Jahre Lebensdauer Batterien

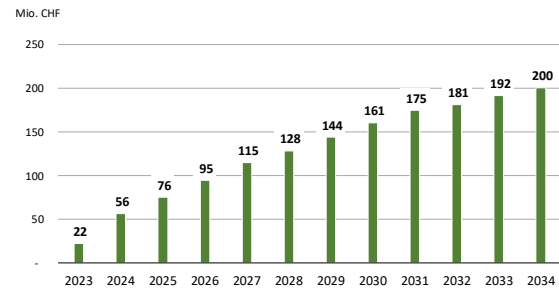
Regionalverkehr (RPV)

Szenario «maximal»

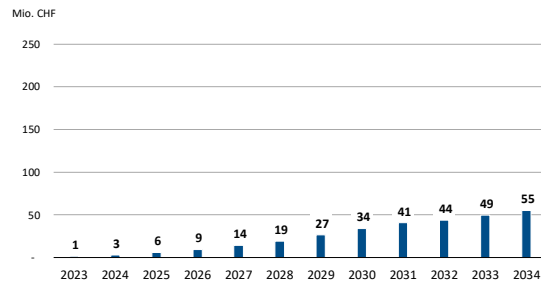


Ortsverkehr

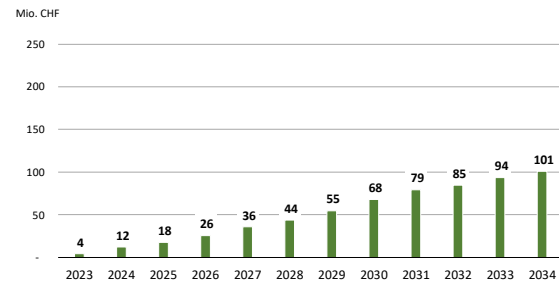
Szenario «maximal»



Szenario «realistisch»



Szenario «realistisch»



Grafik INFRAS. Die Abschätzungen beziehen sich auf die aktuellen Rahmenbedingungen mit Mineralölsteuer-Rückerstattung

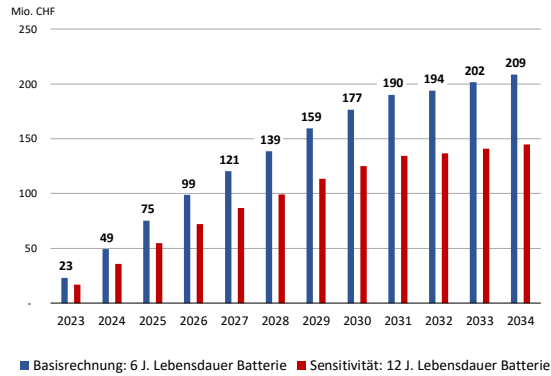
Die folgenden Abbildungen zeigen die Effekte von Sensitivitäten hinsichtlich Lebensdauer der Fahrzeuge und Batterien bei den Elektrobusen auf die Mehrkosten gegenüber Dieselnbussen. Dargestellt sind die Mehrkosten der Basisrechnung und der Sensitivität, jeweils mit Mineralölsteuer-Rückerstattung.

In der Abbildung 43 ist die Sensitivität «Lebensdauer E-Busse 12 Jahre / Lebensdauer Batterien 12 Jahre» abgebildet. Im RPV wie auch im Ortsverkehr verringern sich die Mehrkosten gegenüber Dieselnbussen vor allem bei den Depotladerbussen mit grossen, teuren Batterien. Im Szenario «maximal» reduzieren sich die Mehrkosten unter Beibehaltung der Mineralölsteuer-rückerstattung um ca. 30% gegenüber der Basisrechnung (mit 6 Jahren Batterielebensdauer), beim Szenario «realistisch» gar um 60%, weil hier der unterstellte Depotlader-Anteil grösser ist.

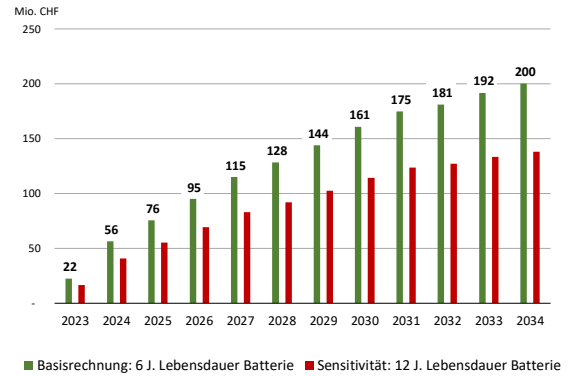
Abbildung 43: Jährliche Mehrkosten bei Umstellung von Dieselnbussen auf Batteriebusse – Sensitivität (Grob-schätzung mit MinöSt-Rückerstattung)

Sensitivität mit 12 Jahre Lebensdauer Fahrzeuge (alle Antriebsoptionen) und 12 Jahre Lebensdauer Batterien

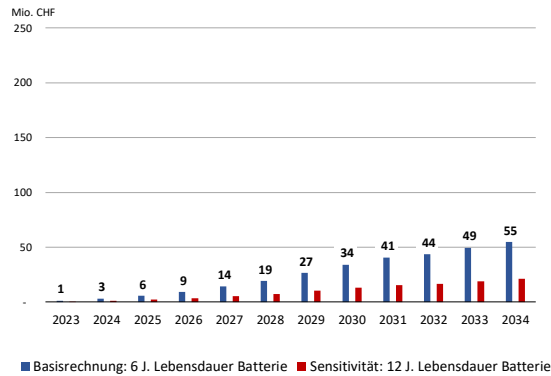
Regionalverkehr (RPV)
Szenario «maximal»



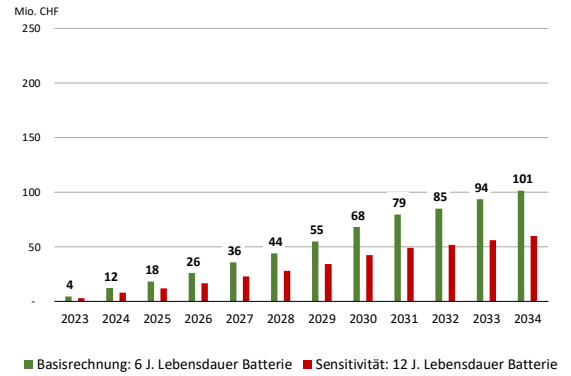
Ortsverkehr
Szenario «maximal»



Szenario «realistisch»



Szenario «realistisch»



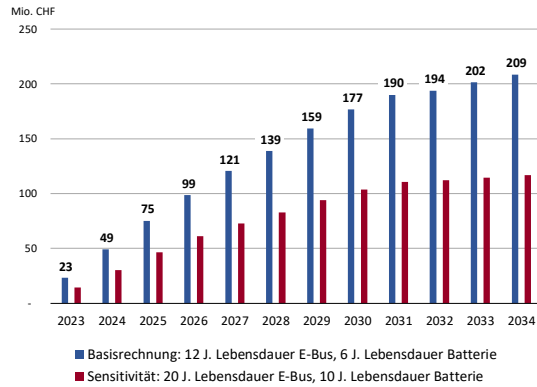
Grafik INFRAS.

Die Abbildung 44 zeigt die Sensitivität «Lebensdauer E-Busse 20 Jahre / Lebensdauer Batterien 10 Jahre». In der Tendenz reduzieren sich hier die Mehrkosten gegenüber den Dieselnbussen noch stärker als bei der Sensitivität «Lebensdauer E-Busse 12 Jahre / Lebensdauer Batterien 12 Jahre». Bei dieser Sensitivität ist jedoch zu beachten, dass keine höheren Unterhaltskosten mit zunehmendem Alter der Fahrzeuge sowie auch keinerlei Refit-Massnahmen im Innern der Fahrzeuge zur Aufrechterhaltung des Fahrgastkomforts unterstellt sind. Beide Aspekte werden jedoch bei einer Lebensdauer von 20 Jahren relevant. Die Auswirkungen dieser Sensitivität werden entsprechend überschätzt (d.h. die Kosten wären in der Realität höher).

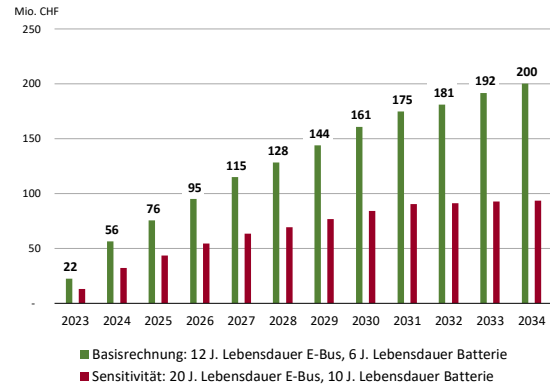
Abbildung 44: Jährliche Mehrkosten bei Umstellung von Dieselnissen auf Batteriebusse – Sensitivität (Groschätzung mit MinöSt-Rückerstattung)

Sensitivität mit 20 Jahre Lebensdauer Elektrobusse und 10 Jahre Lebensdauer Batterien

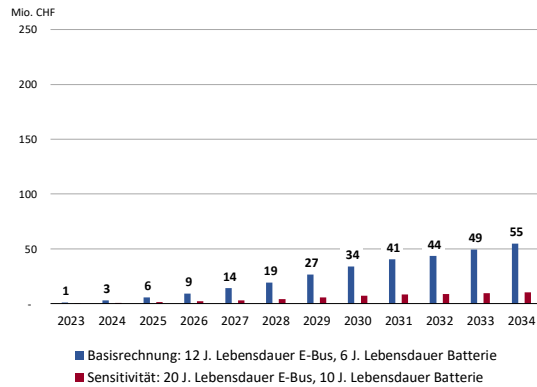
Regionalverkehr (RPV)
Szenario «maximal»



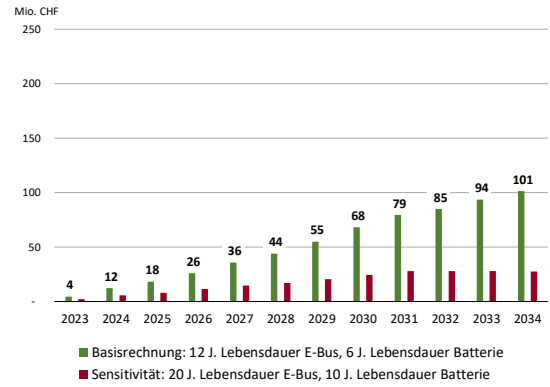
Ortsverkehr
Szenario «maximal»



Szenario «realistisch»



Szenario «realistisch»



Grafik INFRAS.

CO₂-Reduktionspotenzial mit Batteriebusen

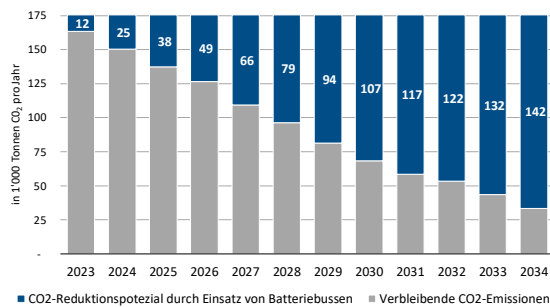
Abbildung 45 zeigt das CO₂-Reduktionspotenzial im Regional- und Ortsverkehr für die beiden Szenarien. Im Szenario «maximal» beträgt dieses im Jahre 2034, wenn sämtliche Dieselbusse auf Batteriebusse umgestellt sind, ein Reduktionspotenzial von 80–85%. Beim Szenario «realistisch» liegt im Regionalverkehr das Reduktionspotenzial im Jahr 2034, wenn rund die Hälfte der Dieselbusse auf fossilsfreie Busse umgestellt sind, bei 40–45%. Im Ortsverkehr sind im Jahr 2034 rund 70% der Dieselbusse auf Batteriebusse umgestellt. Das entsprechende CO₂-Reduktionspotenzial liegt in der Grössenordnung von 60%.

Abbildung 45: CO₂-Reduktionspotenzial einer Umstellung von Dieselbussen auf Batteriebusse

Regionalverkehr (RPV)

CO₂-Emissionen 2019 aller Dieselbusse: 175'000 t/a

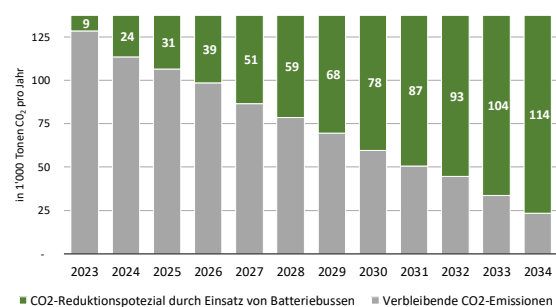
Szenario «maximal»



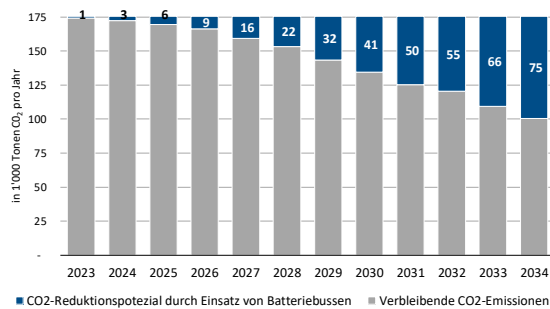
Ortsverkehr

CO₂-Emissionen 2019 aller Dieselbusse: 135'000 t/a

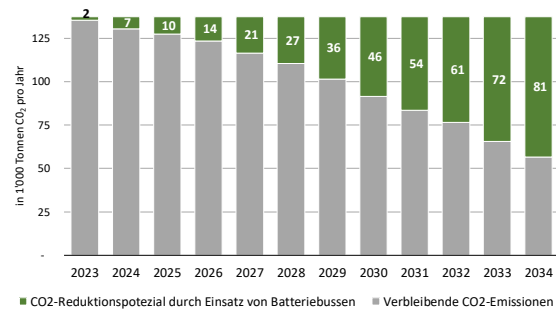
Szenario «maximal»



Szenario «realistisch»



Szenario «realistisch»



Grafik INFRAS.

6.2. Finanzierungsbedarf und Förderinstrumente

Im Folgenden werden die in Kap. 6.1 ausgewiesenen jährlichen Mehrkosten pro Jahr auf Basis der ordentlichen Finanzierung bzw. Bestellverfahren im RPV und OV den bestehenden, nationalen Förderinstrumenten gegenübergestellt. Je nach Szenario und den getroffenen Annahmen kann der Finanzierungsbedarf für den regionalen Personenverkehr und den Ortsverkehr abgeleitet werden.

Annahmen und Herleitung

Für die Abschätzungen wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Grundlage der Abschätzungen bilden die in Kapitel 6.1 (Abbildung 42) hergeleiteten jährlichen Mehrkosten im RPV und OV für die gewählten Szenarien. Zur Beschreibung der Herleitung werden die Abschätzungen unter Berücksichtigung der bestehenden Rückerstattung der Mineralölsteuer für KTU dargestellt.¹⁵⁰
- Es wird davon ausgegangen, dass im Rahmen der ordentlichen Finanzierung aktuell keine zusätzlichen Mittel zur Finanzierung der Mehrkosten bei Bund, Kantonen und Gemeinden eingeplant sind. Im Verpflichtungskredit des Bundes für den RPV für die Jahre 2022–2025 sind rund 10 Mio. CHF pro Jahr für allfällige Mehrkosten oder zusätzlichem Bedarf eingeplant. Die Verwendung dieser Mittel ist jedoch nicht definiert. Aufgrund der aktuellen Situation (Einnahmehausfälle aufgrund Corona) und unsicheren Entwicklung gehen wir daher davon aus, dass für die Marktdurchdringung mit fossilfreien Bussen aktuell keine zusätzlichen Mittel reserviert sind. Zudem ist zu beachten, dass in den Abschätzungen kein Angebotsausbau berücksichtigt ist (vgl. Kap. 6.1).
- Zur Abschätzung des finanziellen Mehrbedarfs für die Schweiz werden die potenziellen finanziellen Mittel der bestehenden Finanzierungs- bzw. Förderinstrumente auf nationaler Ebene geschätzt und von den ausgewiesenen jährlichen Mehrkosten abgezogen, um den verbleibenden Finanzierungsbedarf pro Jahr aufzuzeigen. Die bestehenden Finanzierungs- bzw. Förderinstrumente auf nationaler Ebene umfassen einerseits die zu erwarteten finanziellen Mittel aus dem Förder-/Kompensationsprogramm von myclimate / KliK des Instruments CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure sowie den grob geschätzten jährlichen, finanziellen Bundesbeiträgen aus dem Programm Agglomerationsverkehr (PAV).¹⁵¹

¹⁵⁰ Die Abschaffung der Mineralölsteuerrückerstattung hat massgeblichen Einfluss auf die Höhe der Mehrkosten der alternativ angetriebenen Bussen gegenüber der Referenz (Dieselbus), d.h. im Vergleich zu den Dieselbussen reduzieren sich die Mehrkosten fossilfreier Busse deutlich. Aus Finanzierungssicht führt der Wegfall der Rückerstattung zu einer Erhöhung des Finanzierungsbedarfs, wenn die Mehrkosten nicht durch zusätzliche Einnahmen gedeckt werden. Aus Sicht der Besteller sind daher v.a. die Mehrkosten gegenüber dem status quo (einschliesslich der Mineralölsteuerrückerstattung) relevant. Vor diesem Hintergrund sind die folgenden Abschätzungen einschliesslich der geltenden Mineralölsteuerrückerstattung berechnet.

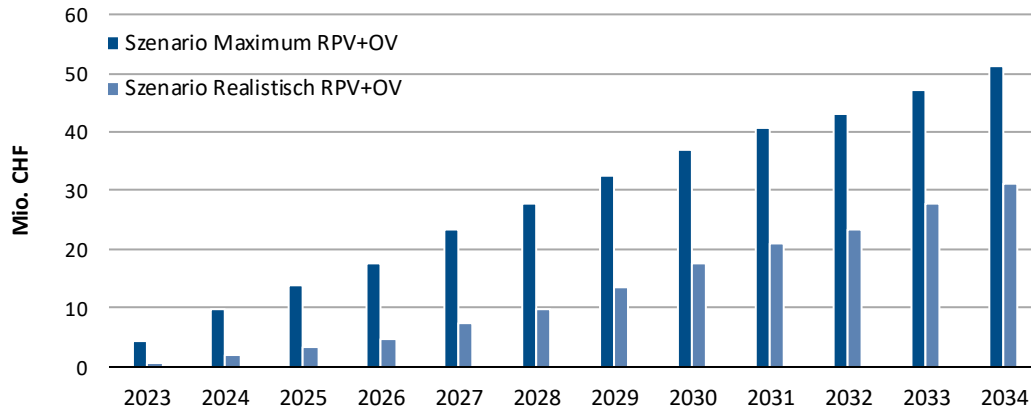
¹⁵¹ Die Bundesbeiträge PAV sind einmalige Investitionsbeiträge an die anrechenbaren Investitionskosten einer Massnahme. Für die vorliegenden Abschätzungen wird davon ausgegangen, dass die Bundesbeiträge aus dem PAV über die Lebensdauer der Anlagen finanziert werden (Annuitätenrechnung).

- Die Potenzialabschätzungen liegen für die Schweiz nicht jedoch für einzelne Kantone und Gemeinden vor. Kantonale und kommunale Fördermassnahmen wurden daher nicht berücksichtigt, wären aber grundsätzlich einzubeziehen.
- Im Ergebnis liegt der verbleibende Finanzierungsbedarf für den RPV und OV vor. Der resultierende zusätzliche Finanzierungsbedarf berücksichtigt dabei lediglich nationale Fördermassnahmen. Der so ausgewiesene Mehrbedarf ist daher als maximale Obergrenze zu betrachten, der im Einzelfall beim Vorhandensein kantonaler und/oder kommunaler Fördermöglichkeiten auch deutlich tiefer liegen kann. Dies ist bei der Diskussion zur möglichen Deckung dieses Finanzierungsbedarfs zu berücksichtigen.

Die Abschätzung des finanziellen Potenzials des Instruments CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure bzw. des **Förder-/Kompensationsprogramms «Hybrid- und Elektrobusse»** basiert auf dem geschätzten, kumulierten CO₂-Reduktionspotenzial pro Jahr für die beiden Szenarien (vgl. Kap. 6.1) und dem ab dem Jahr 2021 geplanten Förderbeitrag von 200 CHF pro tCO₂ für Elektrobusse.¹⁵² Allfällige Vorauszahlungen werden in den vorliegenden Berechnungen nicht berücksichtigt, da die Mehrkosten auf Basis der heutigen Vollkosten aus Sicht der Besteller ausgewiesen werden. Würde davon ausgegangen, dass sämtliche Beschaffungen von elektrisch angetriebenen Bussen ohne jegliche (finanzielle) Einschränkungen durch das Programm gefördert werden, ergäbe sich für den gesamten Zeitraum 2023–2034 theoretisch ein maximales finanzielles Potenzial von insgesamt rund 160 Mio. CHF im Szenario «realistisch» bis knapp 350 Mio. CHF im Szenario «maximal» (Abbildung 37). Dies würde einer Förderquote von 9–20%, d.h. einem Anteil des finanziellen Beitrags an den Mehrkosten gegenüber einem Dieselmotor (inkl. Mineralölsteuerrückerstattung, inkl. Ladeinfrastruktur), entsprechen.

¹⁵² In der vorliegenden Studie wird die Umstellung auf Batteriebusse angenommen.

Abbildung 46: Maximales, theoretisches finanzielles Potenzial des Programms myclimate/KliK des Instruments CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure im RPV + OV bei einem Beitrag von 200 CHF/tCO₂ p.a. für Elektrobusse



OV: Ortsverkehr, RPV: Regionaler Personenverkehr

Grafik INFRAS. Quelle: eigene Schätzungen.

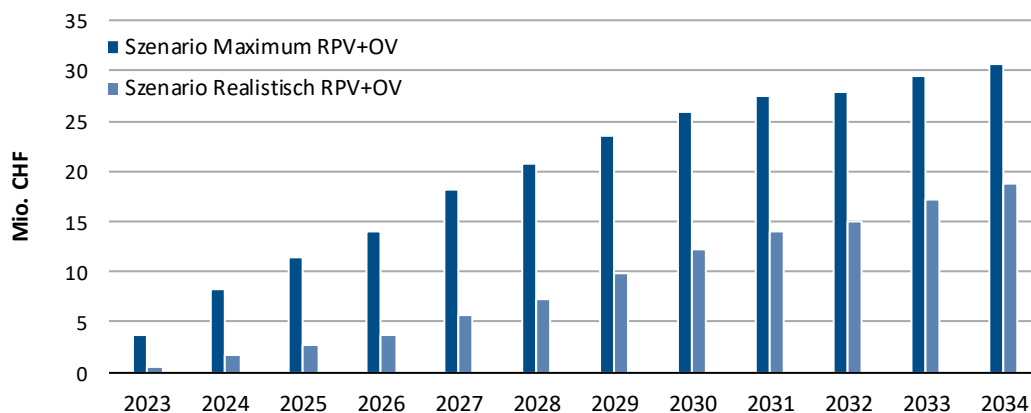
Vor dem Hintergrund der bereits bestehenden gesetzlichen Vorgaben wie beispielsweise in Basel-Stadt (Zusätzlichkeit nicht gegeben) oder der Nichtinanspruchnahme des Programms von einzelnen TU vor dem Hintergrund der von den TU gewünschten Anrechnung der CO₂-Reduktionen (keine Doppelzählungen) wie z.B. in der Stadt Zürich zur Anrechnung der CO₂-Reduktionen im Rahmen der 2000-Watt-Gesellschaft (vgl. Kap. 5.2.3) ist davon auszugehen, dass nur ein Teil der Mehrkosten durch das Programm tatsächlich finanziell unterstützt werden kann und das maximale finanzielle Potenzial nicht ausgeschöpft wird. Mit zunehmender Marktdurchdringung fossilfreier Busse verliert das Kompensationsprogramm sukzessive an Bedeutung, weil die Umstellung von Diesel- auf fossilfreie Busse auch im Rahmen der ordentlichen Finanzierung und vereinzelt ergänzend durch kantonale oder kommunale Förderprogramme finanziert wird. Die Hochrechnung des tatsächlichen (realistischen) finanziellen Potenzials für die gesamte Schweiz ist mit grossen Unsicherheiten behaftet. Das Kompensationsprogramm ist grundsätzlich unbefristet, aber aktuell bis Juni 2026 akkreditiert.

Für die vorliegenden Abschätzungen wurde grob geschätzt für beide Szenarien davon ausgegangen, dass der Anteil der Mehrkosten, für die ein finanzieller Beitrag aus dem Kompensationsprogramm des Instruments CO₂-Kompensationspflicht der Treibstoffimporteure gezahlt wird, sukzessive sinkt. Hierbei gehen wir rechnerisch vereinfacht davon aus, dass in beiden Szenarien der Anteil, der aus dem Kompensationsprogramm geförderten CO₂-Reduktionen gemäss geschätztem Reduktionspotenzial (Kap. 6.1), von grob geschätzt 95% im Jahr 2020 auf 60% im Jahr 2034 sinkt (-2.5 Prozentpunkte p.a.). Aufgrund dieser Annahmen ergeben sich die in Abbildung 47 dargestellten, geschätzten realistischen finanziellen Beiträge aus dem Programm des

Instrumente CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure. Für den gesamten Zeitraum 2023–2034 ergäbe dies insgesamt rund 109 Mio. CHF im Szenario «realistisch» bis 241 Mio. CHF im Szenario «maximal». Hierbei sind zur Vereinfachung allfällige finanzielle Restriktionen nicht berücksichtigt. Beispielsweise können in der Periode 2020–2023 gemäss myclimate / KliK maximal 100 Fahrzeuge vorfinanziert werden. Wie sich die Höhe der Vorfinanzierung zukünftig entwickeln wird, kann aktuell nicht beurteilt werden.

Unter den beschriebenen Annahmen würde der Anteil der jährlichen Mehrkosten, der durch das Kompensationsprogramm «Hybrid- und Elektrobusse» finanziell gefördert wird, im Szenario «realistisch» durchschnittlich rund 8% betragen. Für die folgende Abschätzung des Finanzierungsbedarfs wird das in Abbildung 47 dargestellte realistische, finanzielle Potenzial auf Basis des ab dem Jahr 2021 geltenden Förderbeitrags von 200 CHF/tCO₂ für Elektrobusse zugrunde gelegt.¹⁵³

Abbildung 47: Geschätztes realistisches, finanzielles Potenzial des Programms myclimate/KliK des Instruments CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure im RPV + OV bei einem Beitrag von 200 CHF/tCO₂ p.a. für Elektrobusse



OV: Ortsverkehr, RPV: Regionaler Personenverkehr

Grafik INFRAS. Quelle: eigene Schätzungen.

Ergänzend können im **Programm Agglomerationsverkehr** die Mehrkosten der Ladeinfrastrukturen durch den Bund mitfinanziert werden. Die Bundesbeiträge PAV sind einmalige Investitionsbeiträge an die anrechenbaren Investitionskosten einer Massnahme. Für die vorliegenden Abschätzungen wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Bundesbeiträge aus dem PAV über die gesamte Lebensdauer der Anlagen finanziert werden.

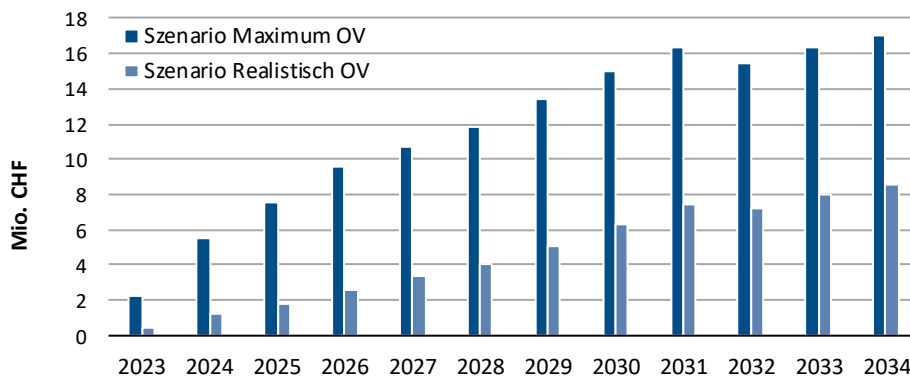
Zur Abschätzung des Finanzierungspotenzials des PAV wurde wie folgt vorgegangen:

¹⁵³ Im Rahmen des Instruments CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure könnten weitere Programme initiiert werden. Im Rahmen der Grundlagenstudie haben wir lediglich das bestehende Programm «Hybrid- und Elektrobusse» berücksichtigt.

- Es wurden die jährlichen Mehrkosten für Ladeinfrastrukturen und Oberleitungen (infrastrukturelle Massnahmen) für die zwei Szenarien «realistisch» und «maximal» grob geschätzt. Wie bereits erläutert, wurden die jährlichen Mehrkosten pro Jahr gemäss Bestellverfahren ausgewiesen.
- Wir nehmen einen durchschnittlichen Anteil des Bundes an den Mehrkosten von 40% an. Dieser Anteil liegt etwas höher als der Durchschnitt von 35%. Dieser höhere Anteil wurde gewählt, um potenzielle Finanzierungsbeiträge des Bundes an die Mehrkosten von Fahrzeugen ebenfalls zu berücksichtigen. Im Rahmen des PAV werden auch Mehrkosten für Fahrzeuge aufgrund der Einsparung von Infrastrukturkosten durch den Bund mitfinanziert. Abschätzungen hierzu sind schwierig. Zudem stellt sich die Frage, wie diese von den Mehrkosten von Ladeinfrastrukturen abzugrenzen sind.
- Zudem gehen wir davon aus, dass der Bund im Rahmen des PAV lediglich Massnahmen an den Ortsverkehr mitfinanziert, da der RPV durch den Bund bereits mitbestellt und mitfinanziert wird.

Aufgrund dieser Annahmen und Abschätzungen ergeben sich für den OV die in Abbildung 48 dargestellten, grob geschätzten jährlichen Bundesbeiträge aus dem PAV.

Abbildung 48: Geschätztes finanzielles Potenzial der Bundesbeiträge aus dem PAV im OV p.a., inkl. Mineralölsteuerrückerstattung KTU

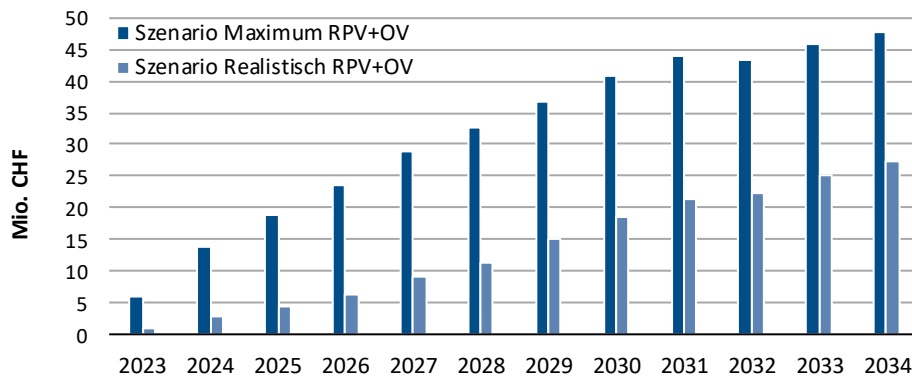


OV: Ortsverkehr, PAV: Programm Agglomerationsverkehr

Grafik INFRAS. Quelle: eigene Schätzungen.

Insgesamt ergeben sich die in Abbildung 49 geschätzten jährlichen Förderbeiträge auf nationaler Ebene, was für den Zeitraum 2023–2034 einem kumulierten Beitrag von rund 165 Mio. Franken im Szenario «realistisch» bzw. ca. 380 Mio. Franken im Szenario «maximal» entspricht.

Abbildung 49: Geschätztes finanzielles Potenzial des Programms myclimate / KliK des Instruments CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure und des PAV im RPV und OV p.a., inkl. Mineralölsteuerrückerstattung KTU

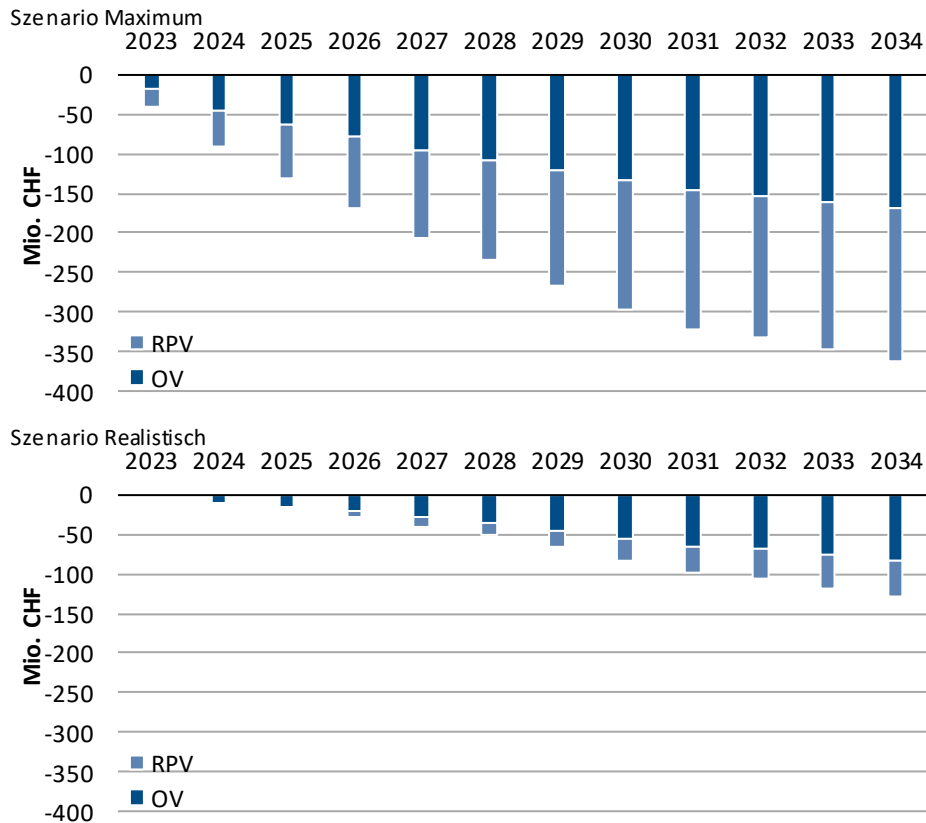


OV: Ortsverkehr, PAV: Programm Agglomerationsverkehr, RPV: Regionaler Personenverkehr

Grafik INFRAS. Quelle: eigene Schätzungen.

Unter Berücksichtigung dieser bestehenden Finanzierungs- bzw. Förderinstrumente wird der resultierende Finanzierungsbedarf aufgrund der geschätzten Mehrkosten im RPV und OV ausgewiesen (Abbildung 50).

Abbildung 50: Finanzierungsbedarf unter Berücksichtigung nationaler Fördermassnahmen im RPV und OV, inkl. Mineralölsteuerrückerstattung



OV: Ortsverkehr, RPV: Regionaler Personenverkehr

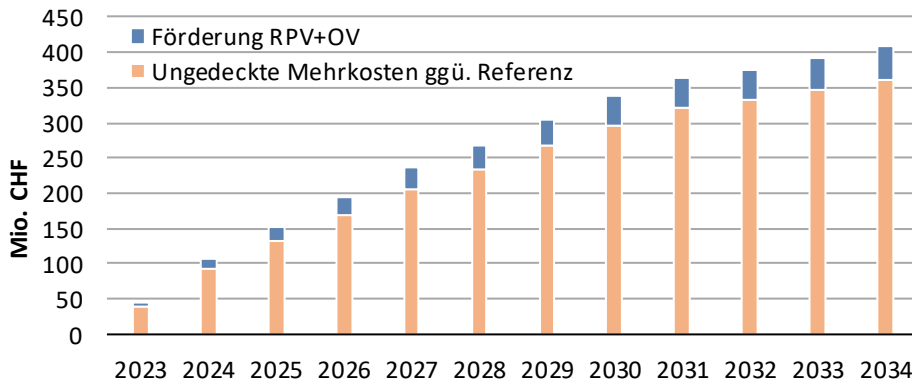
Grafik INFRAS. Quelle: eigene Schätzungen.

Der Anteil der durch bestehende, nationale Förderbeiträge gedeckten jährlichen Mehrkosten im RPV und OV beträgt rund 17–19% (Szenario «realistisch») bzw. rund 12–13% (Szenario «maximal») unter Berücksichtigung der Mineralölsteuerrückerstattung für die KTU. Die ausgewiesenen ungedeckten Mehrkosten sind als maximale Obergrenze zu betrachten, die im Einzelfall beim Vorhandensein kantonaler und/oder kommunaler Fördermöglichkeiten auch deutlich tiefer liegen können.

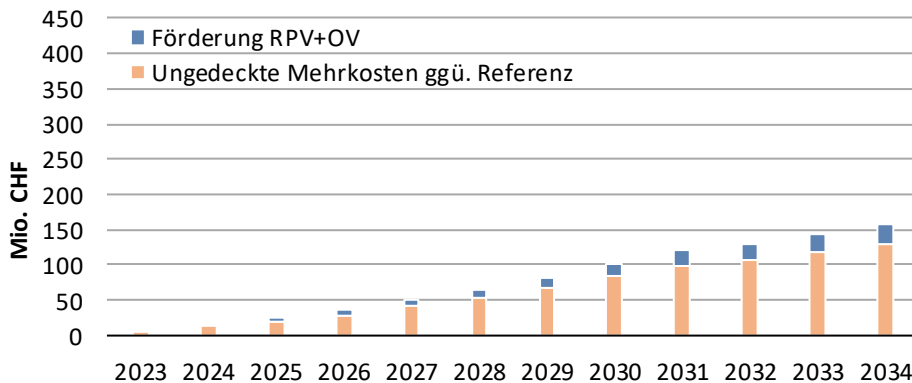
In Abbildung 51 sind die Beiträge aus den bestehenden nationalen Förderungen und der ungedeckten Finanzierungsbedarf für beide Szenarien dargestellt.

Abbildung 51: Entwicklung der durch Förderbeiträge gedeckten sowie ungedeckten Mehrkosten (CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure / myclimate/Klik + PAV) für RPV+OV (inkl. Mineralölsteuerrückstattung KTU)

Szenario «maximal»



Szenario «realistisch»



KTU: Konzessionierte Transportunternehmen, OV: Ortsverkehr, PAV: Programm Agglomerationsverkehr, RPV: Regionaler Personenverkehr

Grafik INFRAS. Quelle: eigene Schätzungen.

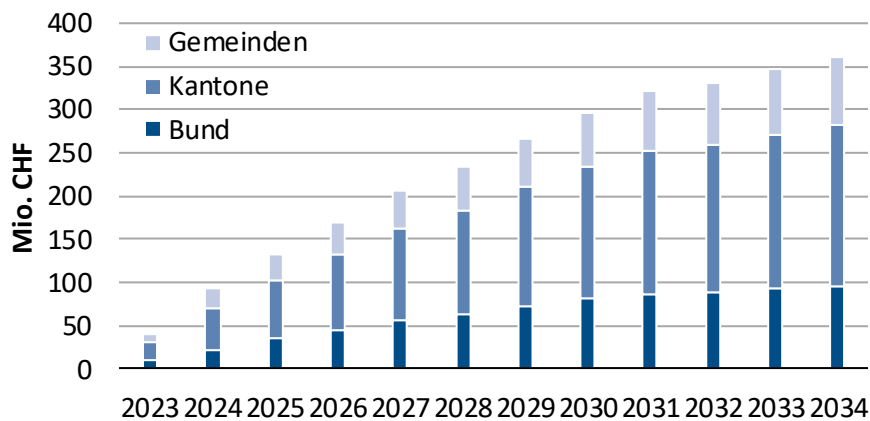
Wird die heutige Aufteilung der Finanzierungsverantwortung im Rahmen der ordentlichen ÖV-Finanzierung beibehalten und werden zudem die bisherigen Finanzierungsanteile von Bund, Kantonen und Gemeinden zugrunde gelegt (Tabelle 13), ergibt sich der in Abbildung 52 geschätzte jährliche Finanzierungsbedarf im RPV und OV aus Sicht der Besteller. Der jährliche Mehrbedarf würde sich von rund 5 Mio. bzw. 40 Mio. Franken im Jahr 2023 auf rund 130 Mio. bzw. 360 Mio. Franken im Jahr 2034 im Szenario «realistisch» bzw. «maximal» erhöhen. Würden die jährlichen Mehrkosten unter diesen Annahmen im Rahmen der ÖV-Bestellung finanziert, würde dies im realistischen Szenario und unter Berücksichtigung der heutigen Mineralölsteuerrückstattung für den Zeitraum 2023–2034 kumulativ ein finanzieller Mehrbedarf von

rund 125 Mio. Franken für den Bund, 395 Mio. Franken für die Kantone und rund 240 Mio. Franken für die Gemeinden bedeuten.

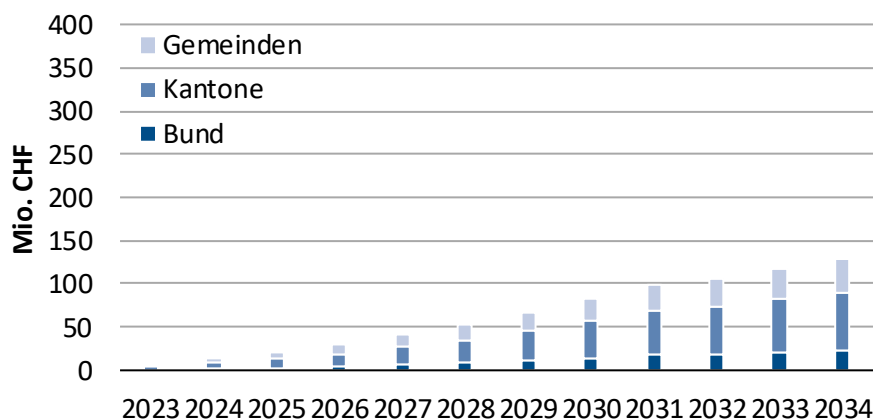
Der Wegfall der Mineralölsteuer würde zwar die Kostendifferenz von Dieselnissen zu fossilfreien Bussen minimieren, für den ungedeckten Finanzierungsbedarf aus Sicht der ordentlichen ÖV-Finanzierung hat dies jedoch keinen direkten Einfluss. Die Mehrkosten für Dieselnisse aufgrund des Wegfalls der Mineralölsteuerrückerstattung würde ebenfalls zu einem Anstieg des ungedeckten Finanzierungsbedarfs führen. Die höheren Einnahmen aus der Mineralölsteuer (inkl. Zuschlag) des Bundes sind mehrheitlich zweckgebunden und würden nicht automatisch zu einer Erhöhung der Bundesmittel für den RPV führen.

Abbildung 52: Mögliche Aufteilung Finanzierungsbedarf gemäss der ordentlichen ÖV-Finanzierung (RPV+OV), inkl. Mineralölsteuerrückerstattung

Szenario «maximal»



Szenario «realistisch»



OV: Ortsverkehr, RPV: Regionaler Personenverkehr

Grafik INFRAS. Quelle: eigene Schätzungen.

6.3. Fazit

Vor dem Hintergrund des Reduktionspotenzials und den regulatorischen Rahmenbedingungen und Finanzierungsmöglichkeiten lassen sich folgende Schlussfolgerungen zusammenfassen:

Potenzial für fossilfreie Busse und Mehrkosten

- Eine kurzfristige vollständige Umstellung der Dieselbusflotte auf Batteriebusse (Szenario «maximal») ist angesichts des technologischen Stands weder im Orts- noch im Regionalverkehr aus wirtschaftlicher Sicht zweckmässig und sinnvoll. Die Batteriebusse sind unter den heutigen Rahmenbedingungen (u.a. auch MinöSt-Rückerstattung) noch vergleichsweise teuer. Und die Depotlader lösen in einigen Fällen wegen noch ungenügender Reichweiten einen höheren Fahrzeugbedarf mit entsprechenden Folgekosten aus. Weil davon auszugehen ist, dass die verfügbaren Finanzmittel von Bund, Kantonen und Gemeinden für den öffentlichen Verkehr beschränkt sind, geht es v.a. kurz-/mittelfristig auch um eine Umweltnutzenoptimierung zwischen Angebotsausbau (mit dem Ziel, die Verlagerung von privatem Personenverkehr auf den öffentlichen Verkehr weiter zu fördern) und dem Einsatz von Elektrobusen. Die Investition in eine Umstellung auf Elektrobusse darf nicht dazu führen, dass die bestehenden ÖV-Angebote (oder Angebotsausbauten) kannibalisiert werden. Die investierten Mittel müssen folglich zusätzlich zur bestehenden Finanzierung des öffentlichen Verkehrs eingesetzt werden.
- Mit dem skizzierten «realistischen» Szenario liessen sich im Zeitraum 2023 und 2034 im RPV rund 50% der heutigen Dieselbusse oder ca. 1'900 Fahrzeuge durch Batteriebusse ersetzen. Im Ortsverkehr könnten im selben Zeitraum rund 70% oder 1'300 Fahrzeuge auf fossilfreie Elektrobusse umgestellt werden.
- Die Mehrkosten gegenüber den Dieselnissen im «realistischen» Szenario bewegen sich im RPV kurzfristig bis 20 Mio. CHF pro Jahr und steigen bis ins Jahr 2030 auf rund 50 - 60 Mio. CHF pro Jahr weiter an, unter der Annahme, dass die Mineralölsteuerrückerstattung für die Dieselbusse weiterhin stattfindet.
- Die Mehrkosten im Ortsverkehr im «realistischen» Szenario bewegen sich kurzfristig zwischen 10 und 40 Mio. CHF pro Jahr und steigen bis 2030 gegen 100 Mio. CHF pro Jahr an, sofern weiterhin die Mineralölsteuerrückerstattung gilt.

Finanzierungsbedarf und Förderinstrumente

- Werden die Mehrkosten fossilfreier Busse gegenüber den Dieselnissen (Referenz) mit und ohne Mineralölsteuerrückerstattung für KTU ausgewiesen, so zeigt sich eine grosse Differenz. Die Mineralölsteuerrückerstattung für KTU stellt einen finanziell bedeutsamen Fehlreiz für die Umstellung auf fossilfreie Busse dar. Eine Aufhebung der aktuell bestehenden

Mineralölsteuerrückerstattung würde den finanziellen Bedarf aus Sicht der Betreiber und bei gleichbleibenden Tarifen der Besteller zunächst erhöhen. Die Aufhebung der Mineralölsteuerrückerstattung setzt aber Anreize für eine beschleunigte Durchdringung fossilfreier Busse, da sie die Mehrkosten fossilfreier Busse gegenüber einem Dieselbus deutlich reduzieren würde.

- Soll die Marktdurchdringung fossilfreier Busse entsprechend dem realistischen Szenario erfolgen, sind die finanziellen Mittel zu erhöhen. Eine finanzielle Förderung fossilfreier Busse bei gleichzeitiger indirekter finanzieller Förderung der Dieselsebusse aufgrund der Mineralölsteuerrückerstattung ist nicht sinnvoll. In einem ersten Schritt sollte die Mineralölsteuerrückerstattung aufgehoben werden.
- Würden die jährlichen Mehrkosten unter diesen Annahmen im Rahmen der ÖV-Bestellung finanziert, würde dies im realistischen Szenario und unter Berücksichtigung der heutigen Mineralölsteuerrückerstattung für den Zeitraum 2023–2034 kumulativ ein finanzieller Mehrbedarf von rund 125 Mio. Franken für den Bund, 395 Mio. Franken für die Kantone und rund 240 Mio. Franken für die Gemeinden bedeuten.
- Die bestehenden nationalen Förderinstrumente (CO₂-Kompensationspflicht Treibstoffimporteure sowie Mittel aus dem Programm für den Agglomerationsverkehr PAV) können einen verhältnismässig kleinen Teil des zusätzlichen Finanzierungsbedarfs decken. Hierbei sind Wechselwirkungen zwischen den Förderprogramm und der ordentlichen ÖV-Finanzierung durch Bund, Kantone und Gemeinden zu berücksichtigen. Das Kompensationsprogramm von myclimate / KliK beispielsweise fördert die Umstellung auf Hybrid- und Elektrobusse, wenn diese nicht ohnehin vorgegeben ist (z.B. gesetzlicher Vorgaben) und nicht anderweitig gefördert wird. Bundesbeiträge aus dem PAV werden nur an Massnahmen gezahlt, die nicht ohnehin vom Bund mitfinanziert werden (z.B. Ortsverkehr).
- Würde die Finanzierung des Mehrbedarfs über die ordentliche ÖV-Finanzierung und Bestellung erfolgen, würden insbesondere die Kantone finanziell zusätzlich belastet, da sie sowohl den RPV als auch den Ortsverkehr mitfinanzieren. Auch aufgrund der aktuellen Situation (Einnahmehausfälle aufgrund Corona) stellt sich die Frage, ob die zusätzlichen finanziellen Mittel insbesondere ab 2024 zur Verfügung gestellt werden können, um die geschätzten Mehrkosten zu finanzieren. Die KTU könnten zur Finanzierung der Mehrkosten die Tarife und damit die Einnahmen erhöhen. Tarifierhöhungen können unerwünschte modale Verlagerungen zur Folge haben. Klima- und verkehrspolitisch ist dies nicht erwünscht, war jedoch nicht Gegenstand dieser Studie bzw. des Postulats.
- Zusätzliche Fördermöglichkeiten des Bundes können die Marktdurchdringung erhöhen. Dabei sollten sich die Förderbeiträge an den Investitionsmehrkosten als auch den Kosten pro

reduzierter Tonne CO₂ orientieren. Aufgrund der komplexen Finanzierung im ÖV ist ein klares, transparentes durchgängiges Förderkonzept notwendig.

Ob und welche zusätzlichen Finanzierungsinstrumente aus Sicht des Bundes geeignet sind, ist letztendlich ein politischer Entscheidung und entsprechend Teil des auf der Grundlagenstudie basierenden Postulatsberichts.

Annex

A1. Hintergrund zu Batterien für Elektromobilität

A1.1. Eigenschaften von Batterien und Annahmen zu deren Entwicklung

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

In dieser Studie betrachten wir ausschliesslich Lithium-Ionen-Batterien, weil diese Familie bei Elektrofahrzeugen praktisch den gesamten Markt ausmacht. Innerhalb dieser Batteriefamilie gibt es unterschiedliche Typen, die unterschiedliche Stärken und Schwächen haben. In unserem Zusammenhang sind die energie- und die leistungsoptimierten Typen von Bedeutung. Energieoptimiert bedeutet, dass pro Batteriegewicht möglichst viel Energie gespeichert werden kann. Eine energieoptimierte Batterie erreicht hohe Werte für die spezifische Speicherkapazität (kWh/kg) und eignet sich speziell für Depotlader. Typische Vertreter dieser Familie sind die NMC Batterien. Leistungsoptimierte Batterien hingegen haben generell eine tiefere spezifische Speicherkapazität, können dafür aber mehr Energie pro Zeit aufnehmen oder abgeben. Typische Vertreter davon sind die Titanat oder LTO-Batterien. Diese können schneller geladen werden als die energieoptimierten Batterien und eignen sich gut für Gelegenheitslader und Brennstoffzellenbusse. Energieoptimierte Batterien sind pro Speicherkapazität deutlich günstiger als leistungsoptimierte Typen. Für beide Typen werden aber in den nächsten 20-30 Jahren grosse Fortschritte erwartet - sowohl bezüglich spezifischer Speicherkapazität (kWh/kg) als auch bezüglich spezifischer Kosten (CHF / kWh) (vgl. Abbildung 54 und Abbildung 55). Die ebenfalls dargestellten LFP Batterien sind besonders günstig und sehr stabil, weisen dafür aber eine relativ geringe Energie- und Leistungsdichte auf. Vor allem chinesische Bushersteller verwenden heute solche Batterien in Depotladern.

Lebensdauer einer Lithium-Batterie

Für die Lebensdauer von Li-Batterien sind verschiedene Faktoren wichtig. Einerseits ist die Lebensdauer begrenzt durch die kalendarische Lebensdauer (shelf life). Das ist die Zeit, die eine Batterie unbenutzt gelagert werden kann, ohne dass die Kapazität signifikant abnimmt. Für moderne Li-Ionen Batterien, wie sie in Bussen eingesetzt werden, liegt dieser Wert zwischen 8 und 12 Jahren.

Der zweite bestimmende Faktor für die Lebensdauer von E-Bus-Batterien ist die Zyklenfestigkeit. Eine Lithiumbatterie für Fahrzeuge weist in Tests typischerweise nach ca. 6000 Vollzyklen noch eine Kapazität von 80% des Neuwerts auf. Ein Vollzyklus bedeutet, dass 100% der Batterie-Energie geladen und entladen wird. bei solchen Tests wird aber nicht von 100% SOC (state of charge / Ladezustand) auf 0% SOC entladen, sondern z.B. von 90% SOC auf 70% SOC, dann geladen auf 80% SOC, wieder entladen auf 60% SOC etc. Der tiefste SOC liegt z. B. bei 30% SOC. Danach wird jeweils 20% addiert, 10% entladen etc. bis man wieder auf 90% ankommt. Mit diesem Regime entspricht ein grosser Zyklus (von 90% SOC auf 30% und zurück auf 90%) 1.4 Vollzyklen. Würde man die Batterie regelmässig von 100% SOC auf 5% entladen und dann wieder laden, läge die Zyklenfestigkeit deutlich unter dem Testwert. Wird eine Batterie hingegen nur zwischen 75% und 25% SOC benutzt, kann sie deutlich länger leben und über 10'000 Vollzyklen erreichen.

Die Kapazität nimmt in der ersten Hälfte der Zyklenfestigkeit relativ stark ab (z.B. von 100% auf ca. 85-90% in den ersten 2000 Vollzyklen). Danach wird die Abnahme mit zusätzlichen Zyklen flacher. Bei guten Batterien kann zwischen 4000 und 6000 Vollzyklen die Restkapazität fast konstant bleiben.

Ein Depotlader, der täglich 60% der Batteriekapazität ausnutzt und einmal täglich geladen wird, kommt auf ca. 220 Vollzyklen pro Jahr. So würde es über 25 Jahre dauern, bis die Batterie aufgrund der Zyklenbeanspruchung am Lebensende ankäme. Selbst wenn ein Depotlader zwei Mal täglich geladen würde, läge die Zyklenfestigkeit noch höher als die kalendarische Lebensdauer der Batterie. Somit kann man für Depotladerbatterien von einer Lebensdauer von 8-12 Jahren ausgehen.

Bei Gelegenheitslader und Batterietrolleybussen sieht die Sache anders aus: Die relativ kleinen Batterien werden mehrfach täglich geladen. Nehmen wir an, dass ein Bus täglich 10 Umläufe fährt und dabei jeweils 50% der maximalen Kapazität ausnutzt, kommt man auf 5 Vollzyklen pro Tag oder auf 1825 Vollzyklen pro Jahr. Somit erlebt diese Batterie in 6 Jahren fast 11'000 Vollzyklen, was nur bei einer relativ geringen Entladung pro Zyklus (max. 50%) realistisch ist.

Zusammensetzung einer Lithium-Batterie

Eine Fahrzeugbatterie besteht zu rund einem Viertel des Gewichtes aus Aluminium und / oder Stahl sowie Kunststoff für das Gehäuse. Rund 75% der Batteriemasse machen die Zellen aus. Diese wiederum setzen sich wie folgt zusammen (Tabelle 27):

Tabelle 27: Zusammensetzung Li-Zelle (NMC)

Material	Anteil %	Masse in Busbatterie (kg)	Bauteil
Stahlgehäuse	16.3%	458	Gehäuse
Kupferfolie	8.8%	248	Anode
Graphit	20.9%	588	
Aluminiumfolie	3.8%	107	Kathode
Kathodenpulver	36.1%	1015	
Nickel//Kobalt/Mangan	21.6%	608	
Lithium	2.6%	73	Elektrolyt
Sauerstoff	11.9%	335	
Elektrolyt	12.8%	360	Elektrolyt
Lithium	ca. 2.6%	73	
Separator	1.4%	39	Separator

Als Elektrolyt wird oft eine 1 molare Lösung von Lithiumhexafluorophosphat (LiPF₆) in Ethylenkarbonat verwendet. Dann besteht der Elektrolyt zu ca. 20% aus Lithium. (Notter et al. 2010)

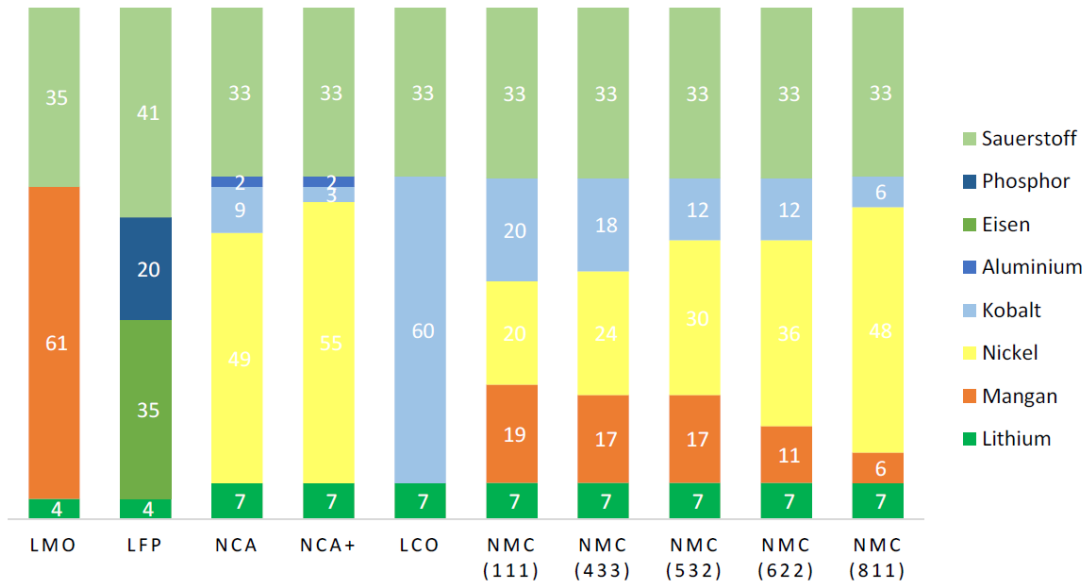
Die Masse in Busbatterie bezieht sich auf eine Batterie mit 450 kWh Energieinhalt und 3750 kg Masse. Das Aluminium- oder Stahlgehäuse der Batterie ist nicht enthalten. Dessen Masse läge bei rund 940 kg

Tabelle INFRAS. Quelle: Batrec 2020 / eigene Berechnung

Die Anteile von Nickel (Ni), Kobalt (Co) und Mangan (Mn) im Kathodenpulver können je nach Batterie unterschiedlich sein. Eine typische Batterie (NMC111) enthält die drei Elemente im Verhältnis 1:1:1. Um Kobalt zu sparen werden aber auch Kathoden mit viel mehr Nickel produziert. Bei einer NMC622 liegt das Verhältnis Co:Ni:Mg bei 1:3:1. Abbildung 53 zeigt die Zusammensetzung von unterschiedlichen Kathodenpulvern.

Eine 450 kWh Batterie, wie sie für die Gelenkbusse der BVB vorgesehen ist, wiegt rund 3750 kg und enthält rund eine Tonne Kathodenpulver. Die Massen aller Materialien sind in Tabelle 27 zusammengestellt. Ein Elektro-PW mit einer Batterie von typischerweise rund 400 kg (50 kWh Energieinhalt) benötigt etwas mehr als 10% der Massen, die für die grosse Bussbatterie benötigt werden.

Abbildung 53: Zusammensetzung Kathodenpulver von unterschiedlichen Zelltypen

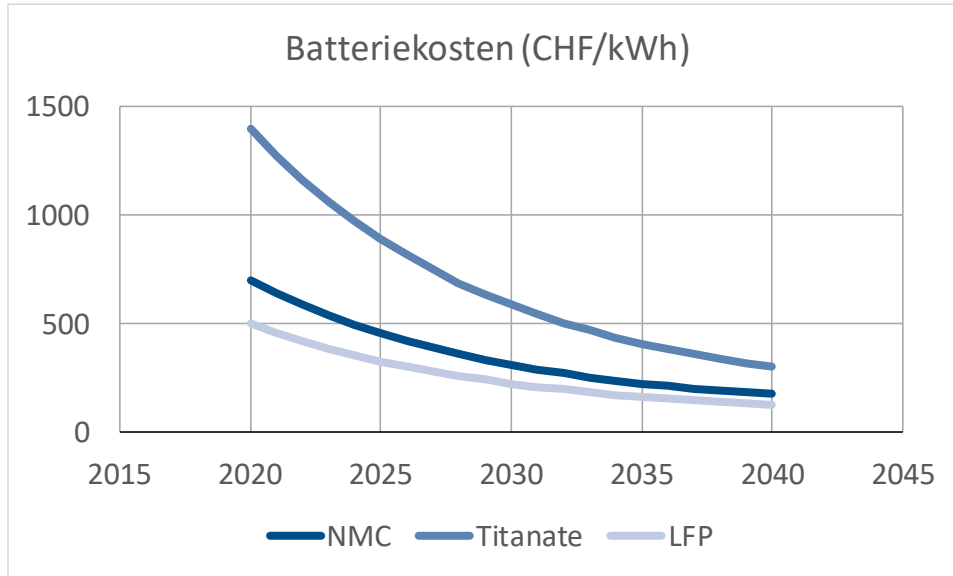


Bei Elektrobussen kommen meistens NMC-Kathoden zum Einsatz. Daneben gibt es auch Busse mit Eisenphosphat Batterien (LFP). NCA kommt praktisch nur bei Tesla vor während Nissan für den Leaf auf kobaltfreie LMO Batterien setzt.

Grafik Batrec 2020

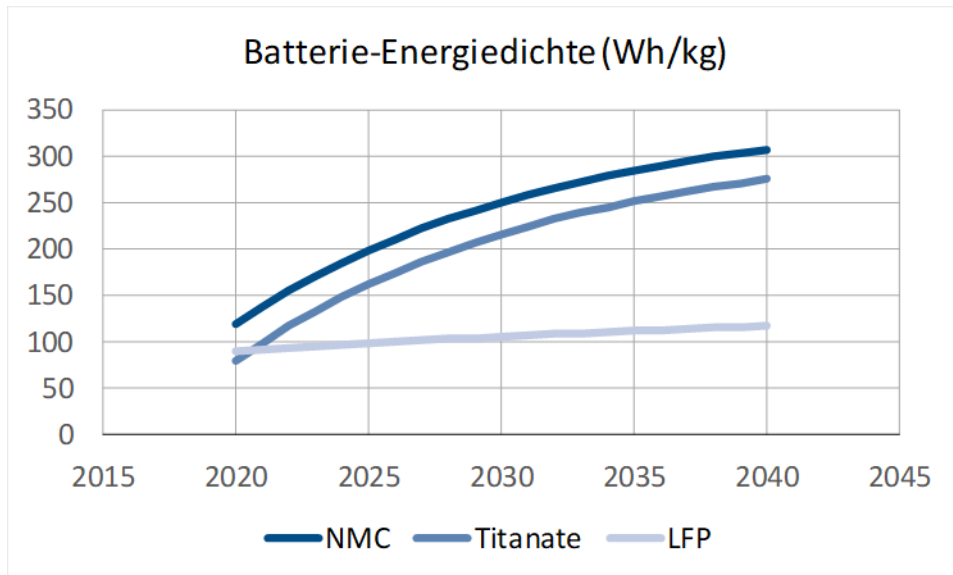
Für den eigentlichen Fahrbetrieb können nicht 100% der Energie einer geladenen Batterie genutzt werden. Um eine möglichst lange Lebensdauer der Batterie zu erreichen, darf die Batterie nicht ganz entladen werden. Ebenfalls reduziert die Alterung die Ladekapazität. Zudem verbraucht ein Elektrobuss auch Energie für die Heizung/Lüftung/Klima (HLK) sowie für weitere Nebenaggregate wie Bordcomputer und Bildschirme. Für den eigentlichen Betrieb inkl. Heizung/Lüftung/Klima stehen damit langfristig, je nach Vorhaltung einer betrieblichen Reserve maximal 60-70% der Batteriekapazität zur Verfügung (vgl. Abbildung 56).

Abbildung 54: Entwicklung spezifische Batteriekosten für Elektrobusse



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

Abbildung 55: Entwicklung spezifische Batteriekapazität für Elektrobusse

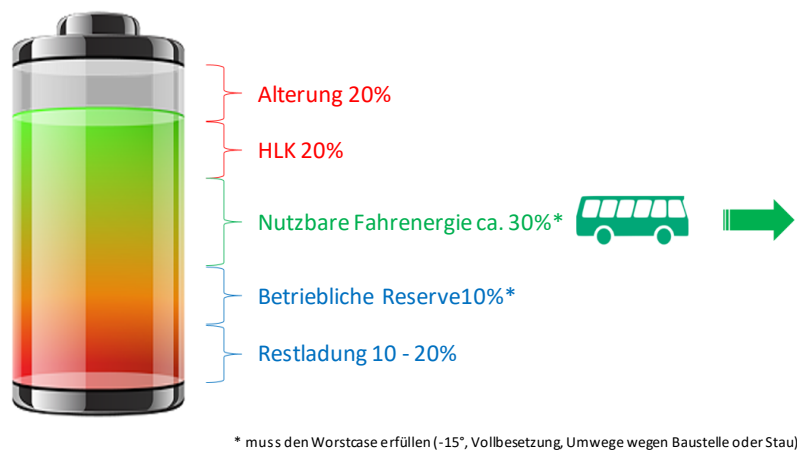


Grafik: INFRAS. Es ist zu beachten, dass Batterien für Busse deutlich geringere spezifische Kapazitäten aufweisen als Batterien für Elektro-Pkw. Quellenangaben siehe unten

Für die Abschätzung der Entwicklung von Kosten und Energiedichten werden die folgenden Quellen verwendet:

- INFRAS 2018: Marktübersicht Bus der Zukunft
- Bloomberg New Energy Finance 2017
- Fraunhofer 2017: Energiespeicher Roadmap
- THELMA 2016: Opportunities and challenges for electric mobility
- Cox B. 2018: Mobility and the Energy transition. Diss. ETH NO 25081
- Cox et al. 2020
- Einbezug von Experten für elektrische Antriebe / Speicher

Abbildung 56: Nutzbare Energie einer geladenen Batterie



Quelle: VBZ

A1.2. Recycling oder «second life» von Batterien am Lebensende

Eine Batterie, wie sie in einem Elektrobus eingesetzt wird, besteht aus mehreren Modulen, die selber wiederum aus mehreren Zellen bestehen. Das Lebensende der Batterie ist erreicht, wenn sie nur noch 80% der ursprünglichen Kapazität aufweist. Das kann der Fall sein, wenn einzelne Zellen defekt sind. In diesem Fall können diese Zellen ausgetauscht und die Batterie im Fahrzeug weiterverwendet werden. Die defekten Zellen müssten dann recycelt werden.

Es kann aber auch sein, dass alle Zellen der Batterie ähnlich gealtert sind und irgendwann jede einzelne Zelle, und damit die ganze Batterie, nur noch auf 80% der ursprünglichen Kapazität kommt. In diesem Fall ist es denkbar, dass die Batterie als Ganzes ausgebaut und in einer stationären Anwendung für einige zusätzliche Jahre genutzt wird. In dem Fall spricht man von einem «zweiten Leben» (second life) der Batterie.

Das kann für einen Busbetreiber zum Beispiel dann sinnvoll sein, wenn er eine PV-Anlage auf dem Depotdach betreibt und die erzeugte Energie in der stationären Batterie zwischenspeichern kann, um nachts die Busse aufzuladen.

Aus ökologischer Sicht ist so eine Verwendung immer sinnvoller als ein sofortiges Recycling der Batterie. Ökonomisch ergibt es, wie gesagt, vor allem dann Sinn, wenn man damit den Eigenverbrauch von erneuerbarem Strom erhöhen kann.

Wenn später die Batterie auch für den stationären Einsatz nicht mehr zu gebrauchen ist oder wenn ein second life von Anfang an nicht sinnvoll war, wird die Batterie mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit recycelt. Mit heutigen Rohstoffpreisen (Co: 30'500 €/t; Ni: 16'000 €/t; Kupfer (Cu): 5'700 €/t; Lithium (Li): 11'200€/t) enthält eine NMC Batterie nämlich diese vier Materialien im Wert von rund 2'700 €/t. Dazu kommt der Wert von Stahl- und Aluminiumschrott. Bei einer grossen Busbatterie von 450 kWh, die rund 3.75 Tonnen wiegt, ergibt sich so ein Materialwert von rund 10'000 € pro Batterie. Wenn der ökonomische Aufwand für das Recyclieren der Batterie unter diesem Wert liegt, wird es sicher erfolgen.

Vor 2010 wurden Lithiumbatterien (aus Laptops, Mobiltelefonen, etc.) typischerweise pyrometallurgisch in einem kombinierten Kupfer-Nickel-Raffinierungsprozess, wie er in Stamp et al. 2013 analysiert ist, recycelt. So konnten Kupfer, Nickel, Kobalt, Zinn sowie allfällig vorhandenes Gold, Silber und Platingruppenmetalle als Metalle zurückgewonnen werden. Lithium hingegen wird in solchen Prozessen oxidiert und landet in der Schlacke, die zum Beispiel im Strassenbau noch eine weitere Verwendung findet.

Da seit rund 10 Jahren immer mehr Elektrofahrzeuge mit Lithiumbatterien in Verkehr gesetzt werden und weil ohne gutes Recycling langfristig ein Versorgungsengpass mit Lithium erwartet wird, ist die Recyclingindustrie seit längerem daran, die Prozesse darauf zu optimieren, auch Lithium in einer für die Batterieproduktion brauchbaren Form zurückzugewinnen. Das wird heute, zum Beispiel bei Batrec in der Schweiz, über hydrometallurgische Prozesse, konkret über Auslaugung der metallischen Fraktion gemacht (Batrec 2020).

A1.3. Umweltaspekte und Rohstoffkritikalität

Die Batterieproduktion benötigt spezifische Materialien und Komponenten, die teilweise mit grossem Energiebedarf produziert werden. So tragen Batterien einen ökologischen Rucksack, der in Lebenszyklusanalysen (= Ökobilanzen = Life Cycle Assessment; LCA) bestimmt wird. Eine LCA untersucht, welche Prozesse benötigt werden, um zuerst die Energieträger und Rohmaterialien und darauf die Materialien und Komponenten und schlussendlich die fertige Batterie zu produzieren. Für jeden einzelnen Prozessschritt werden die benötigten Ressourcen und die

verursachten Emissionen zusammengestellt. Schliesslich werden die Ressourcen und Emissionen aus allen Schritten in der Versorgungskette addiert. So entsteht ein Inventar von allen CO₂, NO_x, SO₂, etc. Emissionen, die verursacht wurden, um eine Batterie zu produzieren. Als letzter Schritt werden dann Emissionen zusammengefasst, die dieselben Umweltschäden bewirken. Zum Beispiel werden so alle Treibhausgase so gewichtet und addiert, dass das totale globale Treibhauspotenzial der Batterieproduktion resultiert.

Neben den Emissionen der Batterieherstellung muss auch der Ressourcenverbrauch von Batterien betrachtet werden. Dabei ist insbesondere auf seltene und kritische Rohstoffe zu achten, die für Batterien sehr wichtig sind. Wir betrachten darum zuerst, aus welchen Materialien bzw. Rohstoffen eine Batterie aufgebaut ist. Danach schauen wir, wie die Ökobilanz der Produktion aussieht und welche dieser Rohstoffe potenziell kritisch sind.

Ökobilanz einer Batterie

Eine der ersten detaillierten und wissenschaftlich publizierten Ökobilanzen einer Li-Batterie für Elektromobilität stammt von der Empa (Notter et al 2010). In dieser Studie wurden alle relevanten Prozessschritte, um von den Rohstoffen zu einer Batterie in einem Fahrzeug zu gelangen, einzeln inventarisiert und abgebildet. Abbildung 57 zeigt die Schritte. Die Studie bezieht sich auf die Produktion einer Lithium-mangan-Oxid-Batterie (LiMn₂O₄/Graphit) in 2015 bis 2020 und berücksichtigt den technologischen Fortschritt, der bis dann erwartet wurde. Die Studie fand einen totalen Beitrag zum Treibhauseffekt durch die Produktion der Batterie von 6.00 kg CO₂-eq pro kg Batterie. Die Zellen der Batterie tragen knapp 75% dazu bei. Der Rest kommt von der Elektronik fürs Batteriemangement, von der Stahlverpackung der Batterie und von den Kupferkabeln. Die grössten Beiträge zur Treibhausbilanz der Batteriezellen kommen von der Kathode (rund 50% der Emission der Zellenproduktion) und von der Anode (rund 25% der Emission der Zellenproduktion). Sowohl für die Ergebnisse der Anoden- wie auch der Kathodenproduktion spielt der Energieaufwand eine viel geringere Rolle als die Materialien, die benötigt werden. Im Produktionsschritt der Zellenproduktion (single cell), der pro kg Batterie knapp 0.4 kg CO₂-eq Emissionen verursacht, spielt hingegen der Strombedarf eine grosse Rolle. In einer Sensitivitätsbetrachtung wurde gefunden, dass die totalen Treibhausgasemissionen einer NMC Batterie nur unwesentlich höher liegen würden.

Andere Studien, die zwischen 2008 und 2012 publiziert wurden, fanden teilweise viel höhere Werte für die Emission von Treibhausgasen aus der Produktion von Lithiumbatterien. Die grossen Unterschiede stammen vor allem von Annahmen zum Strombedarf der Zellproduktion. Tabelle 28 zeigt die Studien im Vergleich mit den Quellen für den Energiebedarf in der Produktion. Diese unterschiedlichen Resultate führten dazu, dass je nach Batteriedaten die Ökobilanz

eines Batteriefahrzeuges im Vergleich zu einem Benzin- oder Dieselfahrzeug besser oder schlechter abschneiden konnte.

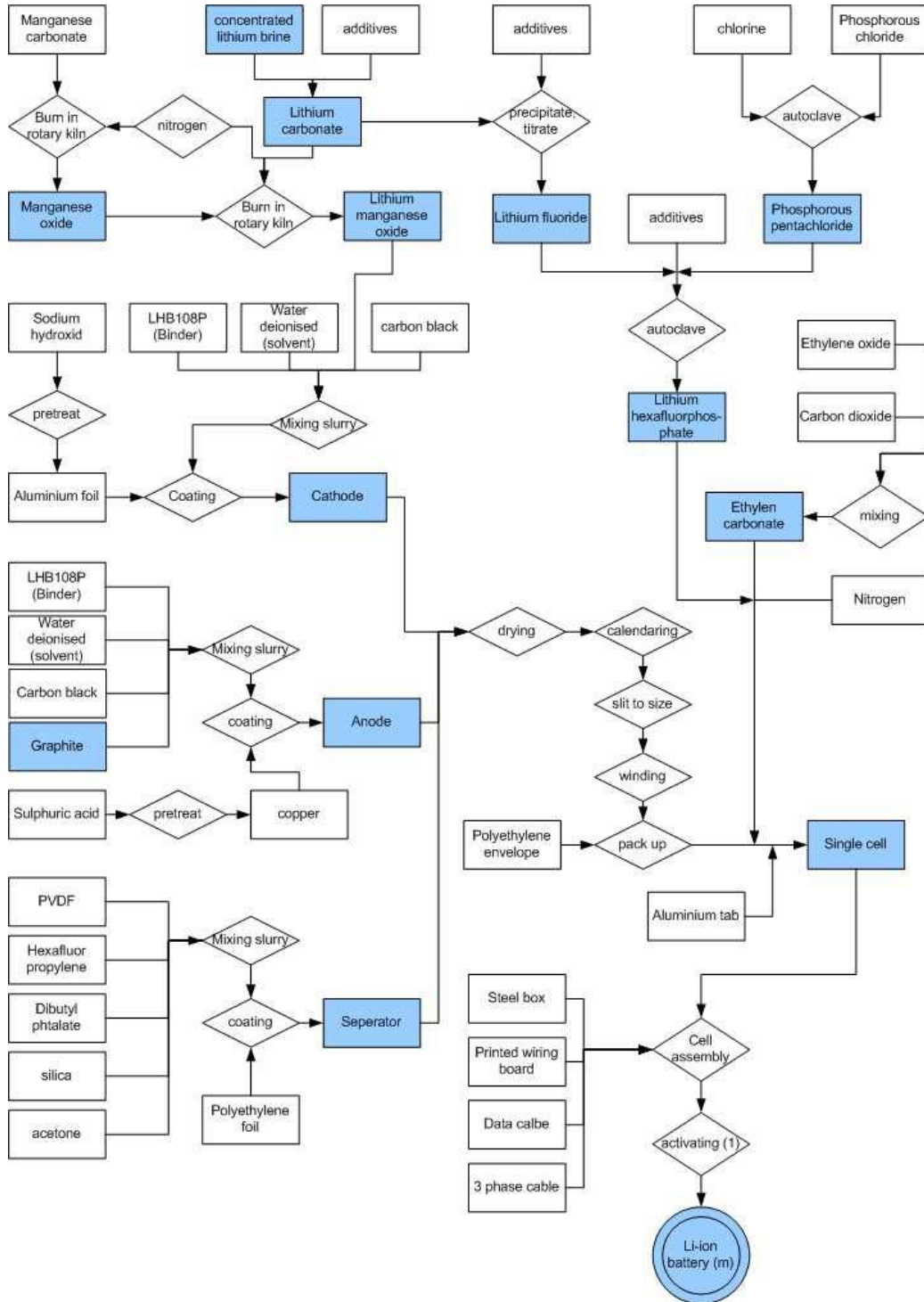
In neueren Studien hat sich der Konsens etabliert, dass die höheren Werte aus Tabelle 28 den Beitrag von Batterien zum Treibhauseffekt überschätzen. Cox et al 2020 hat diese Literatur analysiert und daraus einen Wert von 12 kg CO₂-eq/kg Batterie als den aktuell wahrscheinlichsten Wert abgeleitet. Neuere Ergebnisse des PSI liegen bei 10.8 kg CO₂-eq/ kg Batterie (INF-RAS/PSI/Quantis 2020). Für die künftige Batterieproduktion dürfte der Wert weiter sinken, da davon ausgegangen werden kann, dass die spezifische Emission der Stromproduktion für die Zellfertigung sinken wird. Als konservative Annahme gehen wir heute und für die Zukunft von 10.8 kg CO₂-eq/kg Batterie aus.

Tabelle 28: Vergleich Batteriestudien bis 2012

Referenz	GWP kg/kg	GWP kg/kWh	Quelle Energiebedarf Produktion	Kommentar zu Quelle
Ishihara et al. 2002	6	75	Eigene Messungen / Berechnungen	
Greet 2006	7.5	75	Ishihara et al. 1999	
Notter et al., 2010	6	52	Eigene Berechnungen	
SEI 2007	20	200	Ecoinvent v2.0	Brechungsfehler in Quelle
Samaras and Meisterling, 2008	12	120	Rydh & Sandén 2005	Quelle greift auf eine schwedische Studie für Mobiltelefonbatterien von 1999 zurück. Originalstudie nicht auffindbar.
Majeau-Bettez et al. 2011	22	200 / 250	Rydh & Sandén 2005	
Helms et al., 2010	12	120	Nachhaltigkeitsbericht Sanyo 2008	Energiebedarf über ökonomische Allokation abgeschätzt. Da Li- Batterien zu der Zeit noch sehr teuer waren, wird so der Energiebedarf überschätzt.
Zackrisson et al, 2010	15.5 / 23	166 / 250	Nachhaltigkeitsbericht Saft 2008	
Frischknecht 2012	17.1	171	Nachhaltigkeitsbericht Maxell 2003	

Tabelle: Althaus 2013

Abbildung 57: Prozesse zur Herstellung einer Lithiumbatterie (LiMn₂O₄/Graphit) für Elektromobilität



Grafik Notter et al. 2010 (SI)

Ressourcenkritikalität im Kontext von Batterien und Elektromotoren

Das «National Research Council» hat in der ersten Dekade unseres Jahrhunderts das Konzept der Materialkritikalität entwickelt. In diesem Konzept wird die Kritikalität eines Rohstoffs (oder eines Materials) bestimmt durch die Kombination der Wahrscheinlichkeit, dass Versorgungsengpässe auftreten, und durch die schwere mögliche Auswirkung von solchen Engpässen (National Research Council 2008). Gemäss der Europäischen Definition gilt ein Material dann als kritisch, wenn das Versorgungsrisiko und die potenziellen Auswirkungen eines Unterbruchs der Versorgung beide überdurchschnittlich sind (European Commission 2010).

Folgende Stoffe werden sehr häufig als kritisch beurteilt: Indium, Niob, Platin, Rhodium, Ruthen, Seltenerdelemente und Wolfram. Weitere, häufig als kritisch beurteilte Rohstoffe sind: Antimon, Beryllium, Kobalt, Fluor, Gallium, Germanium, Lithium, Magnesium, die verbleibenden Platinmetalle (Iridium, Osmium, Palladium), Zinn und Zirkon (Erdmann und Graedel 2011). Aus Europäischer Sicht ergibt sich ein etwas anderes Bild (Abbildung 58). Diese unterschiedlichen Beurteilungen machen deutlich, dass Kritikalität kein absolutes Konzept ist, sondern vom Kontext abhängt. Lithium, zum Beispiel, ist im Kontext der Elektromobilität ein sehr wichtiges Element, das aus Europäischer Sicht aber nur eine mittlere wirtschaftliche Wichtigkeit und ein geringes Versorgungsrisiko hat. Aus der Sicht eines Batterieherstellers kann das Versorgungsrisiko aber durchaus beträchtlich sein, da die Herstellung von Lithiumcarbonat, das in der Batterieherstellung als Ausgangsprodukt benötigt wird, bei relativ wenigen Firmen konzentriert ist. Massenmetalle wie Aluminium oder Stahl gelten aber eigentlich nie als kritisch, müssen darum auch nicht weiter betrachtet werden.

Ausgehend von den Materialien, die für Batterien und Elektromotoren¹⁵⁴ wichtig sind, gilt es also die folgenden Materialien zu diskutieren: Kupfer, Nickel, Mangan, Kobalt, Lithium, Graphit und Seltene Erden.

Abbildung 58 zeigt, dass Kupfer, Nickel und Mangan eine mittlere bis hohe wirtschaftliche Wichtigkeit besitzen, aber das Risiko für Versorgungsengpässe sich in einem sehr tiefen Bereich bewegt. Die Metalle werden weltweit an vielen Orten gewonnen und verarbeitet und an Börsen gehandelt. Ein Versorgungsrisiko ist höchstens in einer sehr langen Perspektive auszumachen, wenn der globale Bedarf nach diesen Materialien durch einen massiven Ausbau des Stromnetzes (Kupfer) und / oder der erneuerbaren Stromproduktion und der Elektromobilität über längere Zeit stark ansteigen würde.

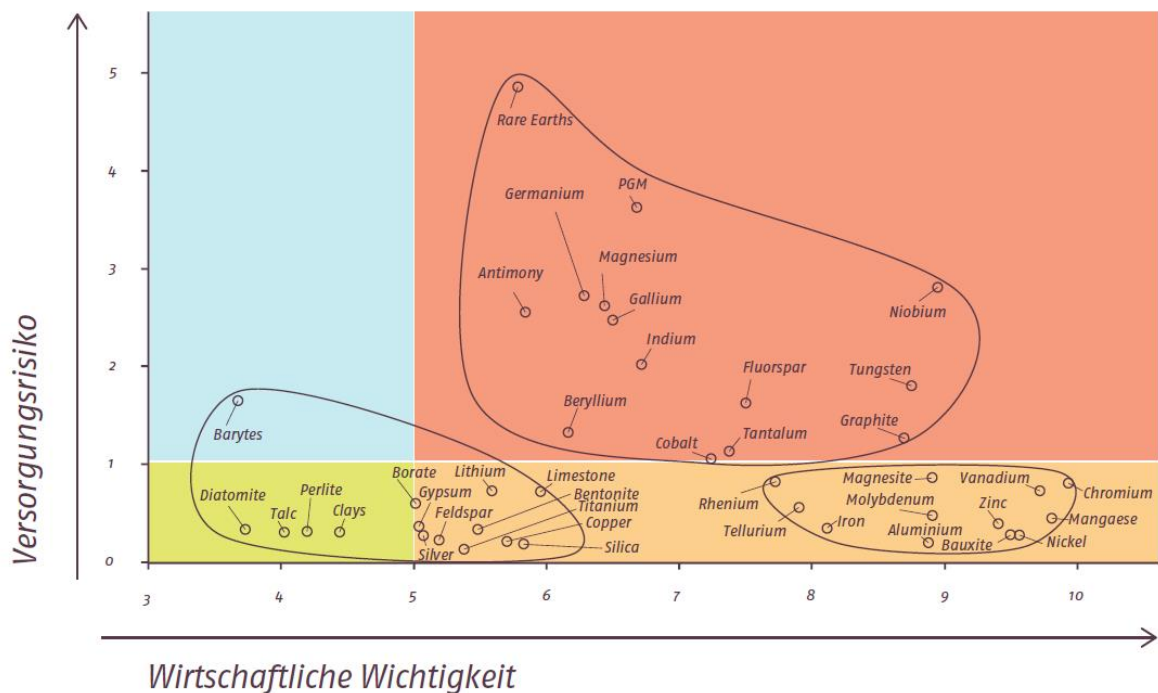
Kobalt und Lithium sind beide von mittlerer wirtschaftlicher Relevanz für Europa. Das Risiko für Versorgungsengpässe ist aus der Perspektive an der Grenze zur Kritikalität. Im Kontext

¹⁵⁴ Elektromotoren bestehen aus Stahl, Kupfer und, sehr oft, Seltenen Erden, die in den Permanentmagneten eingesetzt werden. Auch Kobalt ist in Motoren enthalten.

von Elektromobilität ergibt es also Sinn, diese Materialien als potenziell kritisch zu betrachten und vertieft zu diskutieren.

Graphit und Seltene Erden liegen auch aus gesamteuropäischer Sicht klar im kritischen Bereich. Entsprechend werden diese Materialien im Folgenden genauer diskutiert.

Abbildung 58: Kritikalitätsmatrix gemäss Europäischer Kommission



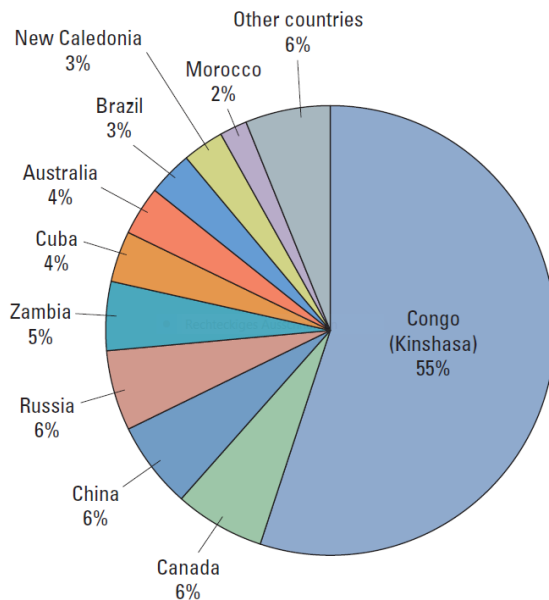
Grafik Swisscleantech. Quelle: European Commission 2010.

Kobalt

Mehr als die Hälfte der globalen Kobalterze kamen 2011 aus Minen aus Kongo (Kinshasa)¹⁵⁵. Geschätzte 15-20% davon werden in kleinen handwerklichen Minen gewonnen (Banza Lubaba Nkulu et al. 2018). Andere wichtige Produzenten sind Kanada, China, Russland, Zambia, Kuba und Australien (Slack et al. 2017). Kobalt wird fast ausschliesslich zusammen mit anderen Metallen (Nickel, Kupfer, Platingruppenmetalle (PGM) und Zink) gefördert. Die Verarbeitung der Erze zu metallischem Kobalt fand 2011 zum grössten Teil in China statt, wo auch ein grosser Teil der Erze aus Kongo (Kinshasa) verarbeitet wurden. Die Erze der anderen wichtigen Länder werden meist im Land selbst verarbeitet.

¹⁵⁵ Kurzname für «Demokratische Republik Kongo»

Abbildung 59: Anteile der globalen Kobalt Produktion in 2011



Grafik Slack et al. 2017

Die Weltproduktion an Kobalt stieg von 1950 bis ca. 1978 von wenigen tausend Tonnen auf knapp 50'000 Tonnen pro Jahr an. Zwischen 1985 und 1994 sank die Produktion auf rund 20'000 Tonnen pro Jahr. Danach kam ein starker Anstieg, wesentlich getrieben von der Einführung und Verbreitung von Lithium-Batterien, auf rund 110'000 Tonnen im Jahr 2011 (Slack et al. 2017). 2018 erreichte die Kobaltweltproduktion mit 148'000 Tonnen ihren bisherigen Höchststand (Statista 2020). 2019 lag die Produktion mit 140'000 Tonnen wieder leicht darunter. Der Rückgang ist damit zu erklären, dass die Produktion höher lag als die Nachfrage und darum auch der Kobaltpreis zurück ging.

Die gesamte globale landbasierte Kobaltressource¹⁵⁶ liegt in der Größenordnung von 25 Millionen Tonnen. Diese Zahl beinhaltet die bereits gewonnene Kobaltmenge, die jedoch verhältnismässig klein ist (Slack et al. 2017). Eine rund vier Mal grössere Menge an Kobalt ist zudem in Sedimenten am Meeresgrund gelagert. Um dieser Ressourcen profitabel zu nutzen braucht es aber noch einige Entwicklung in der Abbautechnologie.

Der Kobaltpreis liegt im langjährigen Schnitt um 30 €/kg (20\$/lb). Wie Abbildung 60 zeigt, sind aber grosse Ausschläge nach oben möglich. Das sieht man häufig bei Metallen, die praktisch ausschliesslich als Koppelprodukt zusammen mit anderen Metallen gefördert werden. In solchen Fällen kann das Angebot nicht so schnell auf eine steigende Nachfrage reagieren, wenn

¹⁵⁶ Dieser Begriff umfasst nur die Vorkommen, bei denen eine vernünftige Aussicht besteht, dass sie ökonomisch profitabel abgebaut werden können.

die Nachfrage nicht auch für die Hauptprodukte gestiegen ist. Oft sind starke Preisschwankungen aber auch kein Zeichen von echten Materialverknappungen, sondern das Resultat von Spekulation. Der Preis für Cobalt Futures (15 Monate) liegt im September 2020 bei 35 \$/t, was etwa dem langjährigen Mittel entspricht.

Neben Batterien, die 2011 rund 30% des Kobalts nachfragten, sind Superlegierungen, speziell harte Werkstoffe für Schneidwerkzeuge, Katalysatoren, Pigmente und magnetische Legierungen (letztere kommen in Elektromotoren zum Einsatz) wichtige Anwendungen für Kobalt.

Kobalt ist für Lithiumbatterien nicht zwingend nötig. LMO und LFP-Zellen kommen ganz ohne Kobalt aus. Dafür erreichen sie auch nur einen Teil der Energiedichte der NMC-Zellen. Andere Zellen (NMC811, NCA) kommen mit deutlich weniger Kobalt aus als die herkömmlichen NMC-Zellen.

Abbildung 60: Entwicklung des Kobaltpreises ab 2005 (in \$/lb)



Grafik <https://www.mining.com/markets/commodity/cobalt/>

Beurteilung der Risiken

Kongo (Kinshasa) ist ein Land mit einer schwachen Infrastruktur, dem Ressourcennationalismus, Korruption und einen Mangel an Transparenz nachgesagt wird. Auch wird das Risiko eines Bürgerkriegs als relativ gross betrachtet (Slack et al. 2017). Dass ein grosser Teil der aktuellen Kobaltproduktion und ein grosser Teil der globalen Ressource in diesem Land liegen, trägt erheblich zur kritischen Beurteilung des Materials bei.

Die relevantesten Umweltschäden im Zusammenhang mit der Gewinnung von Kobalt stammen aus dem Aufbau und dem Betrieb der Mine selbst. Die Landumwandlung zerstört Flächen

und die Bereitstellung der benötigten Energie für Aushub und Transport verursacht Treibhausgas- und Schadstoffemissionen. Im Betrieb der Mine werden auch Chemikalien (häufig Säuren) eingesetzt, mit denen Metalle aus dem Gestein gelöst werden. Und es entstehen grosse Mengen an Abraum (Tailings), die in Tümpeln oder auf grossen Haufen gelagert werden und aus denen über Jahrhunderte beträchtliche Mengen an Schwermetallen ausgewaschen werden können.

Kobalt ist auch direkt toxisch, vor allem wenn es in grösseren Mengen eingeatmet wird. Obwohl es relativ einfach wäre, die Arbeiter in den Minen vor dem Staub zu schützen, wurde in mehreren Studien nachgewiesen, dass Arbeiter, die im handwerklichen Bergbau tätig sind, erhöhte Kobaltkonzentrationen in Blut oder Urin aufweisen (Banza Lubaba Nkulu et al. 2018). Diese Art des Bergbaus ist informell und teilweise auch illegal. Entsprechend gibt es keine Regulierung und / oder Kontrolle bezüglich Arbeitssicherheit, Kinderarbeit und anderen sozialen Aspekten. Viele der grossen Produzenten, die gemäss ihren eigenen Aussagen arbeitsrechtliche Auflagen und lokal geltende Umweltstandards einhalten, sind darüber besorgt, dass Berichte über Kinderarbeit, gefährliche Arbeitsbedingungen und übermässige Umweltwirkungen in der Kobaltproduktion das Image der Produkte und der Industrie belasten. Darum wurde, unter der Flagge des Cobalt Institut¹⁵⁷, «The Cobalt Industry Responsible Assessment Framework (CI-RAF)» entwickelt. In diesem Rahmen verpflichten sich die Produzenten regelmässig über Risiken bezüglich Umwelt, Arbeitsplatzsicherheit und -gesundheit, Einhaltung von Menschenrechten und Umgang mit der lokalen Bevölkerung zu berichten.

Lithium

Lithium wurde 2012 noch rund zur Hälfte aus Salzlaken in Südamerika (vor allem Chile) gewonnen. Die andere Hälfte der Produktion kam aus Australien, Brasilien, China, Portugal und Zimbabwe, wo das lithiumhaltige Gestein Pegmatit abgebaut wird. Die jährliche Produktion ist ab den frühen 1990er Jahren bis 2012 markant angestiegen, wobei vor allem die Produktion aus Lake stark erhöht wurde (Bradley et al. 2017). Seit 2012 wurde vor allem die Produktion in Australien stark erhöht. Sie lag 2019 allein bei 42'000 Tonnen (Statista 2020). Zusammen mit 18'000 Tonnen, die in Chile produziert wurden, 7'500 Tonnen aus China, 6'400 Tonnen aus Argentinien und 3'600 Tonnen aus vier anderen Ländern ergibt sich eine Jahresproduktion 2019 von 77'200 Tonnen (Statista 2020). USGS 2019 spricht von einer globalen Produktion von 85'000 Tonnen in 2018. Das bedeutet etwa eine Verdreifachung der produzierten Menge seit 2012.

Rund ein Drittel der Lithiumproduktion von gut 25'000 Tonnen im Jahr 2012 floss in Keramik- und Glasprodukte. knapp 30% wurde für Batterien genutzt und der Rest verteilte sich auf

¹⁵⁷ siehe <https://www.cobaltinstitute.org/responsible-mining-of-cobalt.html>, access 25.2.2020

unterschiedliche Anwendungen (Bradley et al. 2017). Wenn wir davon ausgehen, dass die Batterieproduktion für den Allergrössten Teil der Expansion der Lithiumproduktion sein 2012 verantwortlich war, kann man davon ausgehen, dass heute rund 75% der Lithiumproduktion für Batterien verwendet wird.

Die globale Ressource lag 2012 bei über 39 Mio. Tonnen (Bradley et al. 2017). 2019 wurde die globale Ressource von derselben Institution (USGS) bereits auf 62 Mio. Tonnen geschätzt (USGS 2019). Es ist ein bekanntes Phänomen, dass mit steigender Nachfrage die Ressource – also das Vorkommen eines Stoffes in der Erdkruste, der in einer derartigen Form, Güteklasse oder Qualität sowie in einer Menge vorliegt, dass eine vernünftige Aussicht auf einen letztendlich ökonomisch profitablen Abbau besteht – nicht kleiner, sondern grösser wird (Althaus et al. 2015). Da die Batterieproduktion für Elektrofahrzeuge in den nächsten Dekaden noch massiv steigen wird, muss man langfristig mit einer wesentlich höheren Nachfrage rechnen. Das bedeutet, dass die geschätzte Ressource von 60 Mio. Tonnen in einigen Jahrzehnten aufgebraucht wäre und dass darum neue Lager erschlossen werden müssen. Eine Möglichkeit ist die Gewinnung von Lithium aus Meerwasser, in dem es in einer durchschnittlichen Konzentration von 0.18 ppm (Wendel 2009) vorkommt. In Entsalzungsanlagen wird das Lithium rund 500-Fach konzentriert und hat dann eine vergleichbare Konzentration zu heute zur Produktion genutzten Laken (100 bis 1000 ppm (Bradley et al. 2017)). Dieser Prozess benötigt viel Energie und verursacht darum hohe Kosten. Entsprechend ergibt eine Lithiumproduktion aus Meerwasser nur Sinn, wenn man das gewonnene Süsswasser nutzen kann.

Im Moment gibt es keine gute Alternative zu Lithium-Ionen-Batterien für Anwendungen in der Elektromobilität. Entsprechend ist diese Technologie bis auf Weiteres auf Lithium angewiesen.

Beurteilung der Risiken

Die aktuelle Produktion von Lithium konzentriert sich auf Australien und Chile. Zumindest Australien gilt als stabiles Land. Zukünftige Produktion wird, aufgrund der steigenden Nachfrage, vermehrt auch in anderen Ländern und Regionen stattfinden. Das geopolitische Risiko für eine Verknappung ist entsprechend relativ gering. Aber die Produktion wird so stark steigen, dass die Verfügbarkeit der Ressource mittelfristig eine Herausforderung wird. In jedem Fall wird es in Zukunft wichtig, Lithium beim Rezyklieren von Batterien in einer Form zurückzugewinnen, in der es auch wieder in Batterien eingesetzt werden kann, was heute oft nicht der Fall ist (cf. Kapitel A1.2).

Die Lithiumproduktion in Australien verursacht, wie jede Bergbauaktivität, Emissionen aus dem Betrieb der Maschinen und Fahrzeuge. Dazu kommen Umweltwirkungen im Zusammenhang mit dem Abraum, der teilweise mit Säuren behandelt wurde und aus dem gelöste Metalle in Boden und Wasser gelangen können.

Lithium ist nur in hohen Konzentrationen toxisch (wird in Medikamenten verwendet). Weil es auch sehr gut wasserlöslich ist, wird es rasch aus dem Körper ausgeschieden. Entsprechend birgt die Gewinnung relativ geringe Risiken für die Umwelt und für die Arbeitskräfte.

Menschenrechtsverletzungen im Zusammenhang mit der Lithiumproduktion sind in Australien unwahrscheinlich. In Chile gibt es Berichte von negativen Effekten der Produktion auf die indigene Bevölkerung. Im Wesentlichen geht es darum, dass die Industrie durch ihren Wasserbedarf bestehende Engpässe verstärkt.

Graphit

Rund 700'000 Tonnen Graphit wurden 2019 in China produziert. Der nächst kleinere Produzent war Brasilien mit knapp 100'000 Tonnen. Darauf folgen Madagaskar, Kanada und Indien mit je knapp 50'000 Tonnen. Weltweit wurden 2019 rund 1.1 Mio. Tonnen Graphit produziert (Statista 2020). Die Produktion ist seit 2010 ungefähr konstant geblieben (Robinson et al. 2017). Graphit wird in offenen Minen oder im Bergbau gefördert, gemahlen und über einen relativ einfachen Prozess angereichert.

Neben der Nutzung von Graphit als Anoden in Batterien wird es auch als Anode bei Elektrolysen oder als Graphen in Solarzellen eingesetzt. Andere Anwendungen sind Feuerfestmaterialien (z.B. in Hochöfen oder in der Raumfahrt), Bleistifte und Schmiermittel. Die sich verstärkende Nachfrage nach erneuerbaren Energien und Batterien könnte die Nachfrage nach Graphit mittelfristig etwa verdoppeln (Robinson et al. 2017).

Die ausgewiesene globale Ressource lag 2012 bei rund 80 Mio. Tonnen. allerdings wird geschätzt, dass diese Zahl eigentlich um ein Vielfaches höher liegt, da Ressourcen typischerweise erst kurz vor der Nutzung ausgewiesen werden. Schätzungen gehen in den Bereich von 1'500 Mio. Tonnen (Robinson et al. 2017).

Batterien brauchen Graphit als Anode. Es gibt aber diverse Möglichkeiten andere Materialien einzusetzen. Es wird auch intensiv an anderen Anodenmaterialien geforscht, da man damit die Energie- und / oder die Leistungsdichte der Batterie erhöhen könnte. Ein mögliches Material wäre Silizium oder Silizium-Kohlenstoff-Komposite, andere Forscher setzen auf metallisches Lithium als Anodenmaterial.

Beurteilung der Risiken

Graphit kommt in ausreichenden Mengen in der Natur vor. Entsprechend besteht aus geologischer Sicht keine Knappheit. Allerdings gibt es ein geopolitisches Risiko, da die Produktion v.a. in China konzentriert ist.

Graphit ist ein inertes, nicht toxisches Material und auch das Wirtsgestein ist mehrheitlich unproblematisch. Entsprechend stellt die Produktion nur ein geringes Gesundheitsrisiko dar und der Abraum ist wenig problematisch für die Umwelt.

Wie bei allen Produkten aus China muss damit gerechnet werden, dass es in der Produktionskette von Graphit zu Menschenrechtsverletzungen kommt.

Seltene Erden

Seltene Erden werden kaum in Batterien benutzt, sind aber in Elektromotoren relevant. Da alle Batteriefahrzeuge auch Elektromotoren brauchen, diskutieren wir die Kritikalitätsaspekte auch hier.

Die «Seltene Erden» umfassen 15 chemische Elemente, die im Periodensystem zwischen Lanthan und Lutetium stehen (die Lanthanide) sowie Yttrium, das vergleichbare chemische Eigenschaften hat. Der Name «seltene Erden» kommt aus einer Zeit, in der diese Elemente noch als selten galten, obwohl sie es aufgrund der durchschnittlichen Konzentrationen der Erdkruste eigentlich nicht sind (Van Gosen et al 2017).

Seltene Erden wurden bis 2012 zu weit über 90% in China gefördert. 2010 hat China für den Export Quoten eingeführt und Steuern erhoben, worauf der Preis für diese Materialien stark angestiegen ist. Seither wurden in vielen anderen Ländern und Regionen neue (und alte) Minen (wieder) eröffnet. 2019 lag der Anteil der chinesischen Produktion mit 132'000 Tonnen noch bei 62%. Andere grosse Produzenten sind heute die USA, Burma (Myanmar) und Australien (USSG 2020). Der globalen Jahresproduktion von 210'000 Tonnen (in 2019) steht eine Reserve¹⁵⁸ von 120 Mio. Tonnen gegenüber (USGS 2020). Van Gosen et al 2017 schätzen die Ressource auf mehrere Tausend Mio. Tonnen.

Der grösste Teil der Seltene Erden werden in der Glasindustrie verwendet. Mit ihnen können Gläser gefärbt oder entfärbt werden und die schwereren Elemente erhöhen den Brechungsindex des Glases, was sie für optische Linsen interessant macht. Eine andere wichtige Anwendung sind Katalysatoren, zum Beispiel in Ölraffinerien. Die Anwendung, die im Kontext der Elektromobilität relevant sind, sind die Permanentmagnete, die in den Elektromotoren ein-

¹⁵⁸ Der Begriff der «Reserve» bezeichnet denjenigen Teil der angezeigten oder gemessenen «Ressource», welcher mit der heutigen Technologie sowie im gegenwärtigen Marktumfeld ökonomisch profitabel abgebaut werden kann.

gesetzt werden. Hier wird vor allem Neodym und kleinere Mengen von Dysprosium, Gadolinium und Praseodymium verwendet. Neben Elektromotoren brauchen auch Generatoren, z.B. für Windkraftwerke, Harddisks und Mobiltelefone solche Magnete.

Permanentmagnete werden in Motoren von Elektrofahrzeugen nicht unbedingt benötigt. Es gibt auch Motoren, die mit Spulen statt Permanentmagneten funktionieren. Der Wirkungsgrad wird damit allerdings etwas schlechter.

Beurteilung der Risiken

Seit die Produktion nicht mehr fast vollständig in China stattfindet, sind die geopolitischen Risiken für eine Verknappung stark zurückgegangen. Eine geologische Knappheit hat nie bestanden. Trotzdem werden, mit zunehmender Nachfrage nach einigen Elementen dieser Familie, Recyclingprozesse immer wichtiger. Sowohl in der USA als auch in Europa sind von staatlicher und von industrieller Seite grosse Anstrengungen diesbezüglich im Gange.

Vorkommen von seltenen Erden weisen oft auch Spuren der radioaktiven Elemente Thorium und Uran auf. Sie werden meist im Tagebau gewonnen und aufbereitet. Der Abraum, der bei den Minen abgelagert wird, ist entsprechend problematisch.

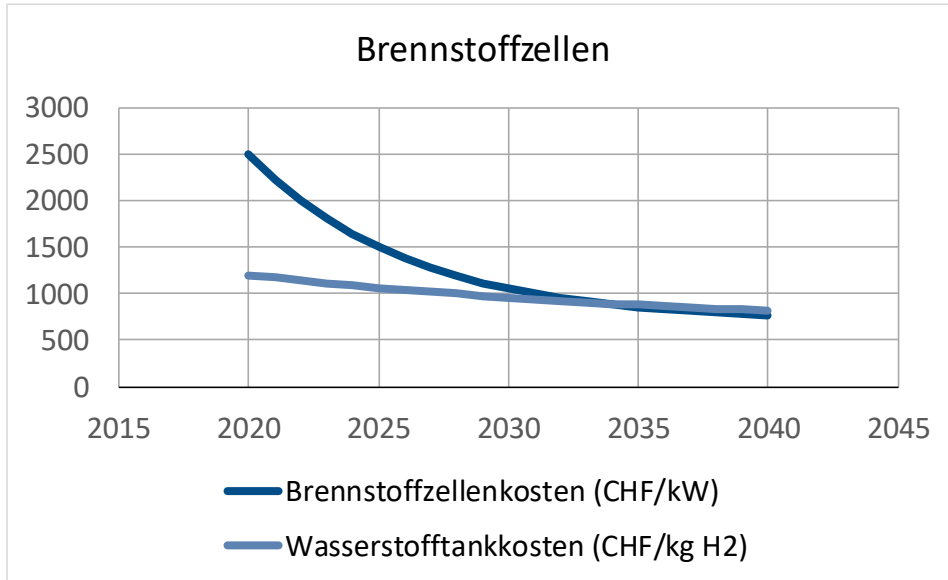
Wie bei allen Produkten aus China muss damit gerechnet werden, dass es in der Produktionskette von Seltenen Erden Elementen zu Menschenrechtsverletzungen kommt. Die Produktionen in den USA und in Australien sind diesbezüglich weniger verdächtig. Zur Situation in Burma (Myanmar) wurde diesbezüglich nichts gefunden.

A2. Hintergrund zu Brennstoffzellen

Die im Fahrzeugbereich am häufigsten verwendeten Brennstoffzellen-Module sind sogenannte «polymer electrolyte membrane fuel cell» (PEMFC). Die typische elektrische Leistung solcher Module für schwere Nutzfahrzeuge liegt im Bereich von 60-180 kW, was in etwa der durchschnittlich benötigten Leistung eines Normal- oder Gelenkbusses entspricht. Solche Module wiegen zwischen ca. 250 und ca. 400 kg. Vor wenigen Jahren kosteten die Brennstoffzellen-Module für einen Normalbus noch rund 600'000 Euro. Heute liegen sie gemäss Angaben von Ballard in der Grössenordnung von 200'000- 300'000 Euro. Ziel von Ballard ist, diese Kosten noch einmal zu halbieren.

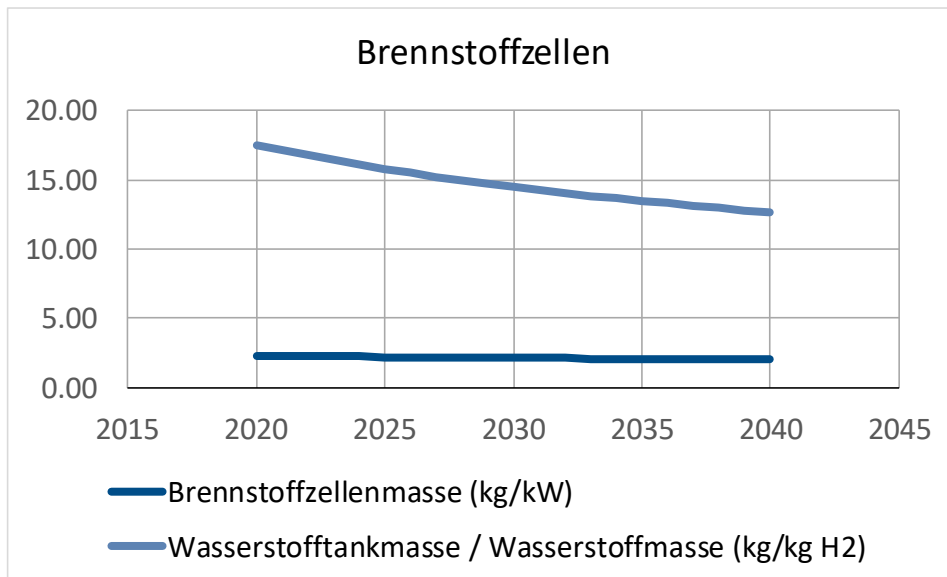
Die Herstellung eines Brennstoffzellensystems und Wasserstofftanks für einen E-Bus verursacht Treibhausgasemissionen in der Grössenordnung der Herstellung einer Gelegenheitslader-Batterie von 400 kWh. Die Lebensdauer von Brennstoffzellen-Modulen liegt heute im Bereich von typischen Batterie-Lebensdauern.

Abbildung 61: Spezifische Kosten für Brennstoffzellen und Wasserstofftanks im Zeitverlauf



Grafik INFRAS.

Abbildung 62: Spezifische Massen für Brennstoffzellen und Wasserstofftanks im Zeitverlauf



Grafik INFRAS.

A3. Hintergrund zu erneuerbaren Treibstoffen

Zu den erneuerbaren Treibstoffen gehören auch Bio- und synthetische Treibstoffe, die aus erneuerbarem Strom erzeugt werden. Das Potenzial von beiden Quellen ist beschränkt. Im Zuge der Bemühungen, Treibhausgasemissionen massiv zu reduzieren, wird aber die Nachfrage nach solchen Brenn- oder Treibstoffen sowohl im Verkehrssektor als auch in anderen Sektoren (z.B. Industrie) steigen. Das bedeutet, dass die verfügbaren Mengen an solchen Treib- und Brennstoffen voraussichtlich schon bald voll ausgeschöpft sein werden. Es ist aber sehr schwierig vorzusehen, wie die unterschiedlichen Sektoren und Anwendungen innerhalb der Sektoren auf eine Verknappung reagieren werden. Somit kann (im Rahmen dieser Arbeit) nicht bestimmt werden, ob genügend erneuerbare Treibstoffe für Busse des öffentlichen Verkehrs zur Verfügung stehen werden oder nicht.

Es gibt Anwendungen, bei denen kaum Alternativen zu flüssigen Kohlenwasserstoffen als Treib- bzw. Brennstoffe bestehen. Dies ist insbesondere die Luftfahrt und, etwas weniger ausgeprägt, die Seefahrt. Auch für Langstreckengütertransporte auf der Strasse dürften zumindest mittelfristig kaum im grossen Stil realisierbare Alternativen existieren. Wir gehen davon aus, dass die Zahlungsbereitschaft dieser Anwendungen für flüssige erneuerbare Treibstoffe höher sein wird, als die von Anwendungen mit günstigeren Alternativen wie dem Bussektor.

A3.1. Biotreibstoffe

Biotreibstoffe umfassen Biodiesel, Bioethanol und Biogas. Bioethanol spielt bei schweren Nutzfahrzeugen keine Rolle und wird darum nicht weiter angeschaut.

Biodiesel:

Über 99% des zurzeit global produzierten Biodiesels stammen direkt aus den Früchten von Ölpflanzen. Solche Treibstoffe sind bei Busbetrieben in der Schweiz bisher nicht im Einsatz, weil sie nicht von der Mineralölsteuerbefreiung profitieren können und darum kein Anreiz für deren Verwendung besteht. Heute zum Einsatz kommt in der Schweiz praktisch nur Biodiesel aus gebrauchtem Speiseöl. Der grösste Teil des heute verfügbaren Biodiesels aus gebrauchtem Speiseöl wird durch Veresterung der pflanzlichen Öle hergestellt und FAME (fatty acid methyl ester) genannt. FAME ist, anders als fossiler Diesel, kein reiner Kohlenwasserstoff, sondern ein Fettsäuremethylester, der wegen den Sauerstoffatomen in seiner Molekülstruktur hygroskopisch und leicht korrosiv ist und einen etwas tieferen Energieinhalt hat als fossiler Diesel. Nicht speziell deklarerter Diesel an der Tankstelle darf gemäss der «Dieselnorm» (EN 590) bis zu 7% FAME enthalten. In dieser Beimischung kann es in jedem normalen Dieselmotor verwendet werden. Einige Hersteller von schweren Nutzfahrzeugen bieten aber schon länger Modelle an, die auch mit 100% FAME betrieben werden können. Eine Alternative zur Veresterung von

Pflanzenöl ist deren Hydrierung, also eine Umwandlung der Fettsäuren in reine Kohlenwasserstoffe durch Hydrierung mit Wasserstoff. Grundsätzlich können die gleichen Rohstoffe verwendet werden wie für die FAME-Produktion. Bei so hergestelltem Biodiesel spricht man von hydriertem Pflanzenöl oder HVO (hydrogenated vegetable oil). HVO ist chemisch sehr ähnlich zu fossilem Diesel und darf gemäss Dieselnorm in beliebigen Mengen (also auch zu 100%) in Diesel enthalten sein.

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

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

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

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

Biogas

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

Biogasfahrzeuge und -Tankstellen sind vielerorts bereits in Betrieb. Die Fahrzeuge weisen jedoch im Vergleich zu Biodieselfahrzeugen eine deutlich geringere Energieeffizienz auf. Zudem wird bei der Produktion des Biogases wie auch beim Betanken immer eine bestimmte Menge Biogas emittiert. Weil dieses Methan ein starkes Treibhausgas ist, verursachen Biogasfahrzeuge etwas höhere THG-Emissionen als Biodieselfahrzeuge.

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

A3.2. Synthetische Treibstoffe

Zu den synthetischen Treibstoffen zählen wir hier die sogenannten «Power-to-X» (PtX) Treibstoffe, deren chemisch gespeicherter Energieinhalt durch den Einsatz von (erneuerbarem) Strom aufgebaut wurde. Konkret trifft das zu für Wasserstoff (H₂) aus Elektrolyse und auf flüssige oder gasförmige Kohlenwasserstoffe, die aus solchem Wasserstoff und aus CO₂, das aus der Luft gewonnen wird, hergestellt werden.

Wasserstoff (PtH₂)

Der grösste Teil des heute benutzten Wasserstoffs wird auf Basis von fossilem Erdgas durch Dampfreformierung hergestellt. Dieser Teil wird aus unserer Studie ausgeschlossen, weil er nicht erneuerbar ist. Erneuerbarer Wasserstoff kann durch Elektrolyse von Wasser mit erneuerbarem Strom produziert werden. Die Elektrolyse findet aus energetischen und ökonomischen Gründen am besten direkt an einem Kraftwerk (z. B. Laufwasserkraftwerk) statt. Damit spart man sich die Übertragungsverluste und -kosten. Kosten und Energieverluste entstehen dafür bei der Elektrolyse, die mit einem durchschnittlichen energetischen Wirkungsgrad von etwa 65% betrieben wird. Um den Wasserstoff zu speichern und zu transportieren muss er auf mindestens 300 bar komprimiert werden, wofür ca. 15% des Energieinhalts des Wasserstoffs aufgewendet werden muss. Damit geht bei der Herstellung und Speicherung von Wasserstoff aus Strom rund 45% der elektrischen Energie verloren.

Im Kontext einer Umstellung des Energiesystems auf CO₂-freie Energie ohne Kernkraft ist aber geboten, Energie möglichst effizient zu verwenden. Da die Stromproduktion in Zukunft stärker auf Wind- und Solarenergie setzen wird, wird die Leistung der gesamten Stromerzeugung zeitlich nicht mehr so konstant sein wie bisher. Mit anderen Worten wird es Zeiten geben, in denen zu viel Strom zur Verfügung steht und Zeiten, in denen Strom eher knapp sein wird.

Wenn zu viel Strom zur Verfügung steht, ist er entsprechend günstig und ein schlechter Wirkungsgrad bei der Energieumwandlung ist in diesen Zeiten weniger problematisch. Darum wurde propagiert, dass dieser günstige Strom dazu verwendet werden könnte, synthetische Treibstoffe herzustellen. So einleuchtend diese Überlegung auf den ersten Blick scheint, hat sie doch ihre Schwierigkeiten: Zeiten mit zu viel Strom aus erneuerbaren Quellen, die nicht über andere Flexibilitäten im System¹⁵⁹ ausgeglichen werden können, kommen insgesamt nicht sehr oft vor. So wird es in Zukunft sicher ein gewisses Potenzial an erneuerbarem Strom geben, der günstig zur Wasserstoffproduktion genutzt werden kann. Das Potenzial wird aber beschränkt sein, weil sich die Investitionen in Produktionsanlagen nur dann amortisieren lassen, wenn diese Anlagen einen grossen Teil der Zeit produzieren können.

Synthetische Kohlenwasserstoffe (PtG / Ptl)

Synthetische Kohlenwasserstoffe werden aus CO₂ und Wasserstoff hergestellt. Das CO₂ wird dabei aus der Luft gewonnen, der Wasserstoff aus Elektrolyse. Prinzipiell kann auf diese Weise Methangas hergestellt werden oder es können langkettige, flüssige Kohlenwasserstoffe hergestellt werden, die mit Diesel vergleichbare Eigenschaften haben.

Die Herstellung von synthetischen Treibstoffen braucht viel (erneuerbaren) Strom, da der energetische Gesamtwirkungsgrad der Produktion in der Grössenordnung von 40% liegt. Im Kontext einer Umstellung des Energiesystems auf CO₂-freie Energie ohne Kernkraft ist aber umso mehr geboten, Energie möglichst effizient zu verwenden. Da die Stromproduktion in Zukunft stärker auf Wind- und Solarenergie setzen wird, wird aber die Leistung der gesamten Stromerzeugung zeitlich nicht mehr so konstant sein wie bisher. Mit anderen Worten wird es Zeiten geben, in denen zu viel Strom zur Verfügung steht und Zeiten, in denen Strom eher knapp sein wird. Wenn zu viel Strom zur Verfügung steht, ist er entsprechend günstig und ein schlechter Wirkungsgrad bei der Energieumwandlung ist in diesen Zeiten weniger problematisch. Darum wurde propagiert, dass dieser günstige Strom dazu verwendet werden könnte, synthetische Treibstoffe herzustellen. So einleuchtend diese Überlegung auf den ersten Blick scheint, hat sie doch ihre Schwierigkeiten: Zeiten mit zu viel Strom aus erneuerbaren Quellen kommen insgesamt nicht sehr oft vor. Das heisst, dass eine Produktionsanlage, die nur diesen «Überschussstrom» verwerten wollte, vielleicht 20% der Zeit laufen würde und den Rest des Jahres stillsteht. Damit würden sich die Investitionen in solch eine Anlage nicht oder höchstens sehr langsam amortisieren lassen. Aus diesem Grund wird erwartet, dass die Preise für synthetische Treibstoffe mittelfristig sehr hoch bleiben werden.

¹⁵⁹ z. B. Wärmepumpen oder Batteriefahrzeuge, die mit einer intelligenten Steuerung dann Strom beziehen, wenn das Angebot hoch ist.

A4. Hintergrund zu Lärm von konventionellen und elektrischen Bussen

Lärm von Bussen wirkt einerseits auf die Passagiere und andererseits auf die Personen, die ausserhalb des Busses dem Lärm ausgesetzt sind. Für den zweiten Fall sind wiederum der Lärm der Busse in Fahrt und der Lärm der Busse im Stehen an den Haltestellen (inkl. Lärm von Ladestationen / Ladevorgängen) zu unterscheiden. Wir diskutieren diese Situationen separat.

Lärm im Bus

Lärm im Inneren von Fahrzeugen setzt sich unter anderem zusammen aus Motorlärm, Strassenlärm, aerodynamischem Lärm und dem Lärm von Komponenten. Das Schallspektrum im Innenraum von Elektrofahrzeugen unterscheidet sich deutlich von dem von konventionellen Fahrzeugen. Zum Beispiel ist bei E-Fahrzeugen der hochfrequente Schall viel lauter als bei konventionellen. Aber auch die tieffrequenten Vibrationen können sehr unterschiedlich sein. Das macht einerseits die Messung schwieriger und andererseits lassen sich die Wirkungen nur bedingt vergleichen (Genuit 2008). Wenige ältere Publikationen zeigen, dass der Schallpegel im Innenraum eines Dieselmotors um die 60 dB liegt. Elektrobusse werden von den Herstellern als leiser beworben, konkrete Messwerte wurden leider nicht gefunden. Aber selbst der Wert für Dieselmotors liegt deutlich unter dem Grenzwert für Lärm am Arbeitsplatz, dem die Beschäftigten während 8 Stunden am Tag ausgesetzt sein dürfen. Vor dem Hintergrund kann man sagen, dass der Lärm im Fahrgastraum von Bussen ein Komfort- aber kein Gesundheitsthema ist. Entsprechend ist es angezeigt, die Lärmsituation im Passagierraum von Bussen aufgrund von Passagierbefragungen zu beurteilen. So wurde in einer schwedischen Studie (Boren et al 2016) die Lärmsituation und der Komfort des getesteten E-Busses (EBusco) von den Passagieren besser beurteilt als der eines Dieselmotors.

Lärm ausserhalb des Busses während der Fahrt

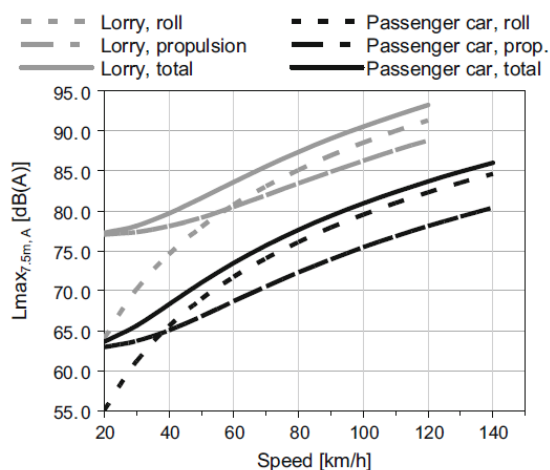
Bei Lärm, anders als bei Schadstoffen und CO₂, hängt sowohl die Emission als auch die Hintergrundbelastung und damit der potenzielle Schaden extrem von Ort und Zeit ab. Trotzdem kann aus einem einfachen Vergleich der durchschnittlichen Emissionswerte eine Abschätzung zu den Veränderungen von Lärmwirkungen gemacht werden, wenn konventionelle Busse durch Elektrobusse ersetzt werden.

Das aktuelle Emissionsmodell für Strassenlärm des Bundes, SonRoad (Heutschi 2004), enthält keine Elektrofahrzeuge. Die Emissionen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für leichte und schwere Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren sind in Abbildung 63 dargestellt. Bei der Interpretation der Grafik ist wichtig zu beachten, dass dB eine logarithmische Skala ist. Eine Erhö-

hung um 3 dB entspricht darum einer Verdoppelung der Schallenergie¹⁶⁰. Bei schweren Fahrzeugen sind gemäss diesem Modell die Antriebsgeräusche bis zu einem Tempo von ca. 50 km/h dominant. Bei rund 40 km/h ist das Rollgeräusch etwa halb so laut wie der Antrieb. Bei Tempo 30 machen die Rollgeräusche noch einen sehr geringen Teil der Lärmemission aus.

Die Lärmemissionen von Elektro- und Dieselbussen unterscheiden sich prinzipiell nicht. Die Lärmemission vom Antrieb hingegen schon. In einer ersten Näherung kann man den Antriebslärm von Elektrobussen sogar vernachlässigen. Bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit (ohne Haltezeiten an den Stationen) von 40 km/h kann man, konservativ geschätzt, von einer Reduktion von 4–7 dB von Elektro- gegenüber Dieselbussen ausgehen.

Abbildung 63: Maximaler Roll- und Antriebslärm von schweren (Lorry) und leichten (passenger car) Strassenfahrzeugen.



Grafik Althaus et al 2009a. Quelle: Heutschi 2004

Noch 2020 soll eine neue Version, SonRoad 18, publiziert werden¹⁶¹, die auch Daten zu Elektrobussen enthält. Die Basis dafür sind Messungen, die von der Stadt Zürich beauftragt und finanziert wurden (B&S 2018a). Abbildung 64 aus dem zugehörigen Messbericht zeigt, dass die aus SonRoad 2004 abgeschätzte Differenz zwischen Diesel- und Elektrobussen in einem vernünftigen Bereich liegen.

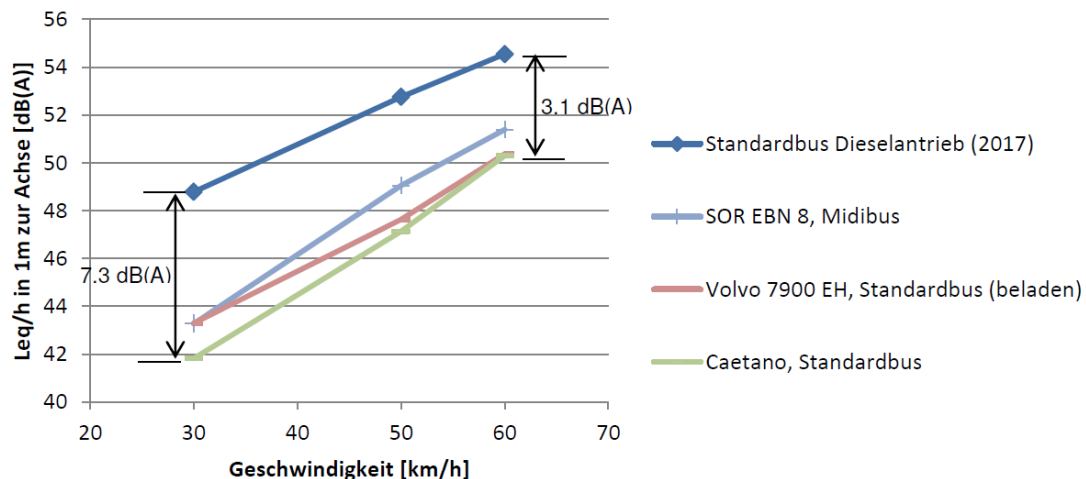
Beim Vergleich der absoluten Werte der beiden Abbildungen ist zu beachten, dass im einen Fall der maximale Schallpegel in 7.5 m Distanz angegeben ist, im anderen Fall der über eine Stunde gemittelte Pegel in einer Distanz von 1m. Die absoluten Zahlen sind also nicht vergleichbar. Eine Messstudie von B&S AG und Empa (B&S 2018b) weist aber darauf hin, dass die

¹⁶⁰ Was aber nicht gleichbedeutend ist mit einer Verdoppelung des wahrgenommenen Lärms bzw. der Wirkung des Lärms.

¹⁶¹ Persönliche Kommunikation mit Kurt Heutschi, Empa. 2.3.2020.

Emissionen für schwere Fahrzeuge nach SonRoad 2004 bei tiefem Tempo (unter 40 km/h) viel höher liegen als in Realität für Busse des öffentlichen Verkehrs.

Abbildung 64: Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit



Durchschnitt aller Messwerte der jeweiligen Bustypen aus 2017

Grafik / Quelle: B+S AG 2018

Grundsätzlich kann man sagen, dass an einer stark befahrenen, lauten Strasse der Beitrag eines Dieselmotors zur Emission der Strasse gering ist, während der Beitrag an einer wenig befahrenen, leisen Strasse relativ gross sein kann. Dasselbe gilt für den Beitrag eines Elektrobusses. Unabhängig von der Verkehrssituation hingegen ist, dass der Beitrag eines Elektrobusses zum Lärmpegel der Strasse etwa 2.5-mal (3-7 dB) tiefer liegt als der Beitrag eines Dieselmotors.

Althaus 2012 hat, basierend auf SonRoad (2004) und SonBase, der Lärmdatenbank des BAfU, die zusätzlichen spezifischen Emissionen für einen zusätzlich gefahrenen Kilometer in unterschiedlichen Kontexten berechnet. Demnach verursacht ein zusätzlicher km mit einem konventionellen Schwere Nutzfahrzeug (3-Achsen) im Stadtgebiet eine zusätzliche Lärmbelastung von $3.6E-9$ dB/km wenn der Kilometer während des Tages gefahren wird. Wird der Kilometer während der Nacht (22 Uhr – 6 Uhr) gefahren, ist der zusätzlich verursachte Lärm mit $5.2E-8$ dB/km sehr viel höher¹⁶². Dieselbe Studie (Althaus 2012) berechnet daraus noch einen Gesundheitsschaden in «Disability Adjusted Life Years Lost» (DALY). Diese Werte basieren auf einem Konzept der WHO (WHO 2011), das unterschiedliche gesundheitliche Beeinträchtigungen normalisiert und in ein Verhältnis zu vorzeitigem Versterben stellt. Ein DALY bedeutet

¹⁶² Grund dafür ist, dass nachts weniger Fahrzeuge unterwegs sind und darum der Beitrag eines einzelnen Fahrzeuges grösser ist

dann, dass durch die gewichteten Effekte des Lärmes so viel Gesundheitsschaden entsteht, wie wenn eine Person ein Jahr früher sterben würde. Die Resultate liegen pro zusätzlichen Kilometer mit einem schweren 3-Achsfahrzeug in städtischem Kontext bei $2.3E-5$ DALY/km für tagsüber gefahrene und bei $2.8E-2$ DALY/km für nächtliche Fahrten. Die Werte für Elektrobusse sind in Althaus 2012 nicht berechnet, müssten aber etwa 2.5-mal tiefer liegen. Weil SonRoad 2004 die Emission von Bussen des öffentlichen Verkehrs aber stark überschätzt (B&S 2018b), sind auch die entsprechenden, nach Althaus 2012 abgeschätzten, DALY stark überschätzt. Eine Hochrechnung der Lärmschäden mit diesen Werten und der Jährlichen Fahrleistung aller ÖV-Busse der Schweiz könnte die effektiven Schäden um etwa einen Faktor 10 überschätzen.

Lärm ausserhalb des Busses an (End-)Haltestellen

Im Stand sind die Schallemissionen von Elektrobussen sehr gering. Sie beschränken sich praktisch auf die Geräusche der Lüftung. Dieselsebussen hingegen verursachen auch im Stand bei laufendem Motor Geräusche, die in einer sonst ruhigen Umgebung durchaus störend sein können. Eine im Sinne der Lärmschutzverordnung kritische Lärmbelastung wird aber durch stehende Busse kaum je verursacht.

Schnellladestationen an den Haltestellen brauchen, aufgrund der hohen Leistung, eine aktive Kühlung, die Geräusche verursachen kann. Da es sich um eine stationäre Anlage handelt, ist eine Schallisolierung bei solchen Anlagen aber bei Bedarf relativ einfach möglich. Das Kontaktieren der Ladeschiene durch den Pantographen verursacht keine relevante Lärmemission, da der Kontakt hergestellt bzw. getrennt wird, während keine Spannung anliegt.

A5. Annahmen für die Kostenrechnung

A5.1. Allgemeine Annahmen

Annahmen für die Mengengerüste		Gelenkbus	Standardbus	Midibus	Kleinbus
Strom: spezif. Energiebedarf inkl. HKL - im Jahr 2020	kWh/km	2.00	1.50	1.10	0.80
Diesel: spezif. Energiebedarf inkl. HKL - im Jahr 2020	L/km	0.50	0.37	0.28	0.20
Wasserstoff: spezif. Energiebedarf inkl. HKL - im Jahr 2020	kg/km	0.13	0.09	0.06	0.05
Biodiesel: spezif. Energiebedarf inkl. HKL - im Jahr 2020	L/km	0.55	0.41	0.31	0.22
Biogas: spezif. Energiebedarf inkl. HKL - im Jahr 2020	kg/km	0.48	0.35	0.26	0.20

Nutzbare Energie der Batterieladung für Betrieb	%	60%
Ladeleistung in Fahrt bei IMC	kW	120
Ladeleistung Ladestation Endhaltestelle	kW	450
Ladeleistung Ladestation im Depot	kW	150
Fahrzeugreserve	%	10%
Anzahl Fahrzeuge pro Ladepunkt im Depot für Depotlader	#	1
Anzahl Fahrzeuge pro Ladepunkt im Depot für Gelegenheitslader und IMC	#	3
Anzahl Gleichrichter pro km Oberleitung	#/km	0.5
Lebensdauer Fahrzeuge	Jahre	12
Lebensdauer Batterien	Jahre	6
Lebensdauer Oberleitung	Jahre	30
Lebensdauer Ladestationen Depot	Jahre	12
Lebensdauer Ladestationen Haltestellen: Stromanschluss/Einbau (Gewichtung: 60%)	Jahre	30
Lebensdauer Ladestationen Haltestellen: Ladestation (Gewichtung: 40%)	Jahre	12
Lebensdauer Gleichrichterstation	Jahre	30
Lebensdauer Stromanschluss im Depot/für Gleichrichter	Jahre	30
Zus. Fahrpersonalaufwand für Fahrt in bzw. aus Depot pro ausgetauschtes Fahrzeug	min	20

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

A5.2. Kostenannahmen Busse

		Gelenkbus (18 m)							
	Einheit	Konventioneller Dieselbus (Euro VI)	Biodieselbus (Euro VI)	Biogasbus	Batterieelektrischer Bus (Depotlader)	Batterieelektrischer Bus (Kombilader)	Batterieelektrischer Bus (Gelegenheitslader)	Trolleybus	Brennstoffzellenbus (H2)
Basisjahr	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Bus Lebensdauer	Jahr	12	12	12	12	12	12	12	12
Jahresstrecke	km/Jahr	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
Buskosten									
Anschaftung	CHF	500'000	520'000	545'000	936'000	964'000	810'000	1'055'000	1'298'000
Variable Kosten (nur Energie und Wartun	CHF/Jahr	107'875	161'627	155'377	69'990	76'655	76'655	77'988	196'087
Energiekosten	CHF/km	0.57	1.11	1.05	0.30	0.30	0.30	0.30	1.40
Mineralölsteuer	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2-Abgabe	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wartung	CHF/km	0.51	0.51	0.51	0.40	0.47	0.47	0.48	0.56
		Standardbus (12 m)							
	Einheit	Konventioneller Dieselbus (Euro VI)	Biodieselbus (Euro VI)	Biogasbus	Batterieelektrischer Bus (Depotlader)	Batterieelektrischer Bus (Gelegenheitslader)	Trolleybus	Brennstoffzellenbus (H2)	
Basisjahr	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	
Bus Lebensdauer	Jahr	12	12	12	12	12	12	12	
Jahresstrecke	km/Jahr	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	
Buskosten									
Anschaftung	CHF	350'000	370'000	395'000	744'000	625'000	825'000	1'043'000	
Variable Kosten (nur Energie und Wartun	CHF/Jahr	80'378	120'155	114'130	52'500	57'500	58'500	142'242	
Energiekosten	CHF/km	0.42	0.82	0.76	0.23	0.23	0.23	1.00	
Mineralölsteuer	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CO2-Abgabe	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Wartung	CHF/km	0.38	0.38	0.38	0.30	0.35	0.36	0.42	
		Midibus (<11 m)							
	Einheit	Konventioneller Dieselbus (Euro VI)	Biodieselbus (Euro VI)	Biogasbus	Batterieelektrischer Bus (Depotlader)	Batterieelektrischer Bus (Gelegenheitslader)	Brennstoffzellenbus (H2)		
Basisjahr	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020		
Bus Lebensdauer	Jahr	12	12	12	12	12	12		
Jahresstrecke	km/Jahr	100000	100000	100000	100000	100000	100000		
Buskosten									
Anschaftung	CHF	330'000	350'000	375'000	640'000	541'000	780'000		
Variable Kosten (nur Energie und Wartun	CHF/Jahr	66'319	96'420	92'003	43'500	48'000	109'079		
Energiekosten	CHF/km	0.32	0.62	0.58	0.17	0.17	0.71		
Mineralölsteuer	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
CO2-Abgabe	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Wartung	CHF/km	0.34	0.34	0.34	0.27	0.32	0.38		

	Einheit	Konventioneller Dieselbus (Euro VI)	Biodieselbus (Euro VI)	Biogasbus	Batterieelektrischer Bus (Depotlader)	Brennstoffzellenbus (H2)
Basisjahr	-	2020	2020	2020	2020	2020
Bus Lebensdauer	Jahr	8	8	8	8	8
Jahresstrecke	km/Jahr	55000	55000	55000	55000	55000
Buskosten						
Anschaffung	CHF	100'000	115'000	133'750	301'000	437'500
Variable Kosten (nur Energie und Wartun	CHF/Jahr	28'308	40'133	40'457	18'975	46'841
Energiekosten	CHF/km	0.23	0.44	0.45	0.12	0.54
Mineralölsteuer	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO2-Abgabe	CHF/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wartung	CHF/km	0.29	0.29	0.29	0.23	0.31

A5.3. Kostenannahmen Ladeinfrastruktur

Annahmen für die NBW-files: Ladeinfrastruktur, div. betriebliche Kosten (aus ehemaligem Tab "Annahmen_Kosten")		Gelegenheitsladung konduktiv- dynamisch (Batterietrolleybus)	Gelegenheitsladung konduktiv-statisch	Depotladung konduktiv-statisch	Brennstoffzelle
Oberleitung Investition	CHF/km	CHF 800'000			
Oberleitung Unterhalt (Strassen-km)	CHF/a/km	CHF 16'000			
Stromversorgung mit Trafo und Gleichrichter	CHF/km	CHF 600'000			
Unterhalt Gleichrichter	CHF/a/km	CHF 12'000			
Schnellladestation (450 kW) Investition	CHF/Stk	CHF 800'000			
Schnellladestation (450 kW) Unterhalt	CHF/a/Stk	CHF 16'000			
Schnellladestation (450 kW) Anschlusskosten	CHF/Stk	CHF 0			
Ladeplatz im Depot (150 kW) Investition	CHF/Stk	CHF 85'000	CHF 85'000	CHF 85'000	
Ladeplatz im Depot (150 kW) Unterhalt	CHF/a/Stk	CHF 4'250	CHF 4'250	CHF 4'250	
Anschlusskosten im Depot 1'000 kW Anschlussleist.	CHF	CHF 210'000	CHF 210'000	CHF 210'000	
Anschlusskosten im Depot 4'000 kW Anschlussleist.	CHF	CHF 650'000	CHF 650'000	CHF 650'000	
Wasserstofftankstelle (inkl. Elektrolyse) Investition	CHF/Stk				CHF 2'000'000
Wasserstofftankstelle (inkl. Elektrolyse) Unterhalt	CHF/a/Stk				CHF 100'000
Wasserstofftankstelle (inkl. Elektrolyse) Anschlusskosten	CHF				CHF 100'000
Fahrpersonalkosten (bei zus. Fahrzeugumläufen)	CHF/h	CHF 65.00	CHF 65.00	CHF 65.00	
Fahrzeug-Fixkosten (bei zusätzlichem Fahrzeugbedarf) (Garagierung, Versicherung, Unterhalt etc.)	CHF/a/Bus	CHF 30'000.00	CHF 30'000.00	CHF 30'000.00	

A6. Annahmen für die Umweltbilanzierung

A6.1. Fahrzeugmassen

		Gelenkbus (18 m)							
	Einheit	Konventioneller Dieselbus (Euro VI)	Biodieselbus (Euro VI)	Biogasbus	Batterieelektrischer Bus (Depotlader)	Batterieelektrischer Bus (Kombilader)	Batterieelektrischer Bus (Gelegenheitslader)	Trolleybus	Brennstoffzellenbus (H2)
Basisjahr	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Bus Lebensdauer	Jahr	12	12	12	12	12	12	12	12
Jahresstrecke	km/Jahr	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000
Busgewicht total leer		18000	18000	18000	21760	21430	19180	18867.5	19524
Glidergewicht	kg	16800	16800	16800	16800	16800	16800	16800	16800
Basisgewicht Antriebsstrang	kg	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200	1200
Gewichtskalierung Antriebsstrang	%	100%	100%	100%	80%	90%	90%	90%	80%
Batterietyp		None	None	None	NMC	NMC	Titanate	Titanate	Titanate
Batteriegewicht (nur zur Info)	kg	0	0	0	4000	3500	1250	937.5	125
Batteriegrösse (kWh) (nur zur Info)	kWh	0	0	0	480	420	100	75	10
Pantograph Masse	kg	0	0	0	0	50	50	50	0
Brennstoffzelle Leistung	kW	0	0	0	0	0	0	0	180
Brennstoffzellenmasse	kg/kW	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
H2-Speicherkapazität	kg H2	0	0	0	0	0	0	0	70
Wasserstofftankenergiedichte	kg/kg H2	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5

		Standardbus (12 m)							
	Einheit	Konventioneller Dieselbus (Euro VI)	Biodieselbus (Euro VI)	Biogasbus	Batterieelektrischer Bus (Depotlader)	Batterieelektrischer Bus (Gelegenheitslader)	Trolleybus	Brennstoffzellenbus (H2)	
Basisjahr	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	
Bus Lebensdauer	Jahr	12	12	12	12	12	12	12	
Jahresstrecke	km/Jahr	100000	100000	100000	100000	100000	100000	100000	
Busgewicht total leer		11000	11000	11000	14300	11887.5	11887.5	12057.5	
Glidergewicht	kg	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	
Basisgewicht Antriebsstrang	kg	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
Gewichtskalierung Antriebsstrang	%	100%	100%	100%	80%	90%	90%	80%	
Batterietyp		None	None	None	NMC	Titanate	Titanate	Titanate	
Batteriegewicht (nur zur Info)	kg	0	0	0	3500	937.5	937.5	125	
Batteriegrösse (kWh) (nur zur Info)	kWh	0	0	0	420	75	75	10	
Pantograph Masse	kg	0	0	0	0	50	50	0	
Brennstoffzelle Leistung	kW	0	0	0	0	0	0	150	
Brennstoffzellenmasse	kg/kW	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	
H2-Speicherkapazität	kg H2	0	0	0	0	0	0	45	
Wasserstofftankenergiedichte	kg/kg H2	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	

		Midibus (<11 m)					
	Einheit	Konventioneller Dieselbus (Euro VI)	Biodieselbus (Euro VI)	Biogasbus	Batterieelektrischer Bus (Depotlader)	Batterieelektrischer Bus (Gelegenheitslader)	Brennstoffzellenbus (H2)
		2020	2020	2020	2020	2020	2020
Basisjahr	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Bus Lebensdauer	Jahr	12	12	12	12	12	12
Jahresstrecke	km/Jahr	100000	100000	100000	100000	100000	100000
Busgewicht total leer		8000	8000	8000	10340	8782.5	8766
Glidergewicht	kg	7200	7200	7200	7200	7200	7200
Basisgewicht Antriebsstrang	kg	800	800	800	800	800	800
Gewichtskalierung Antriebsstrang	%	100%	100%	100%	80%	90%	80%
Batterietyp		None	None	None	NMC	Titanate	Titanate
Batteriegewicht (nur zur Info)	kg	0	0	0	2500	812.5	125
Batteriegrösse (kWh) (nur zur Info)	kWh	0	0	0	300	65	10
Pantograph Masse	kg	0	0	0	0	50	0
Brennstoffzelle Leistung	kW	0	0	0	0	0	120
Brennstoffzellenmasse	kg/kW	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
H2-Speicherkapazität	kg H2	0	0	0	0	0	30
Wasserstofftankenergiedichte	kg/kg H2	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5

		Kleinbus (<9 m)				
	Einheit	Konventioneller Dieselbus (Euro VI)	Biodieselbus (Euro VI)	Biogasbus	Batterieelektrischer Bus (Depotlader)	Brennstoffzellenbus (H2)
		2020	2020	2020	2020	2020
Basisjahr	-	2020	2020	2020	2020	2020
Bus Lebensdauer	Jahr	8	8	8	8	8
Jahresstrecke	km/Jahr	55000	55000	55000	55000	55000
Busgewicht total leer		4800	4800	4800	6180	5374.5
Glidergewicht	kg	4200	4200	4200	4200	4200
Basisgewicht Antriebsstrang	kg	600	600	600	600	600
Gewichtskalierung Antriebsstrang	%	100%	100%	100%	80%	80%
Batterietyp		None	None	None	NMC	Titanate
Batteriegewicht (nur zur Info)	kg	0	0	0	1500	93.75
Batteriegrösse (kWh) (nur zur Info)	kWh	0	0	0	180	7.5
Pantograph Masse	kg	0	0	0	0	0
Brennstoffzelle Leistung	kW	0	0	0	0	90
Brennstoffzellenmasse	kg/kW	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
H2-Speicherkapazität	kg H2	0	0	0	0	22.5
Wasserstofftankenergiedichte	kg/kg H2	17.5	17.5	17.5	17.5	17.5

A6.2. Energiebedarf

		Gelenkbus (18 m)							
	Einheit	Konventioneller Dieselbus (Euro VI)	Biodieselbus (Euro VI)	Biogasbus	Batterieelektrischer Bus (Depotlader)	Batterieelektrischer Bus (Kombilader)	Batterieelektrischer Bus (Gelegenheitslader)	Trolleybus	Brennstoffzellenbus (H2)
Basisjahr	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Energiebedarf									
Energiebedarf (ohne Strom)	kWh/km	5.00	5.00	6.04	0.00	0.00	0.00	0.00	4.15
Energiededarf (nur für Info)	l/km	0.50	0.55	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13
Energiebedarf (Strom Anteil)	kWh/km	0.00	0.00	0.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.00
Energieanteil (km basis)									
Diesel	%	90%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biodiesel	%	10%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Gas	%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biogas	%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%
Strom	%	0%	0%	0%	100%	100%	100%	100%	0%
Wasserstoff	%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%

		Standardbus (12 m)							
	Einheit	Konventioneller Dieselbus (Euro VI)	Biodieselbus (Euro VI)	Biogasbus	Batterieelektrischer Bus (Depotlader)	Batterieelektrischer Bus (Gelegenheitslader)	Trolleybus	Brennstoffzellenbus (H2)	
Basisjahr	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020	2020	
Energiebedarf									
Energiebedarf (ohne Strom)	kWh/km	3.70	3.70	4.39	0.00	0.00	0.00	2.97	
Energiededarf (nur für Info)	l/km	0.37	0.41	0.35	0.00	0.00	0.00	0.09	
Energiebedarf (Strom Anteil)	kWh/km	0.00	0.00	0.00	1.50	1.50	1.50	0.00	
Energieanteil (km basis)									
Diesel	%	90%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Biodiesel	%	10%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	
Gas	%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Biogas	%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	
Strom	%	0%	0%	0%	100%	100%	100%	0%	
Wasserstoff	%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	

		Midibus (<11 m)					
	Einheit	Konventioneller Dieselbus (Euro VI)	Biodieselbus (Euro VI)	Biogasbus	Batterieelektrischer Bus (Depotlader)	Batterieelektrischer Bus (Gelegenheitslader)	Brennstoffzellenbus (H2)
Basisjahr	-	2020	2020	2020	2020	2020	2020
Energiebedarf							
Energiebedarf (ohne Strom)	kWh/km	2.80	2.80	3.34	0.00	0.00	2.11
Energiededarf (nur für Info)	l/km	0.28	0.31	0.26	0.00	0.00	0.06
Energiebedarf (Strom Anteil)	kWh/km	0.00	0.00	0.00	1.10	1.10	0.00
Energieanteil (km basis)							
Diesel	%	90%	0%	0%	0%	0%	0%
Biodiesel	%	10%	100%	0%	0%	0%	0%
Gas	%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Biogas	%	0%	0%	100%	0%	0%	0%
Strom	%	0%	0%	0%	100%	100%	0%
Wasserstoff	%	0%	0%	0%	0%	0%	100%

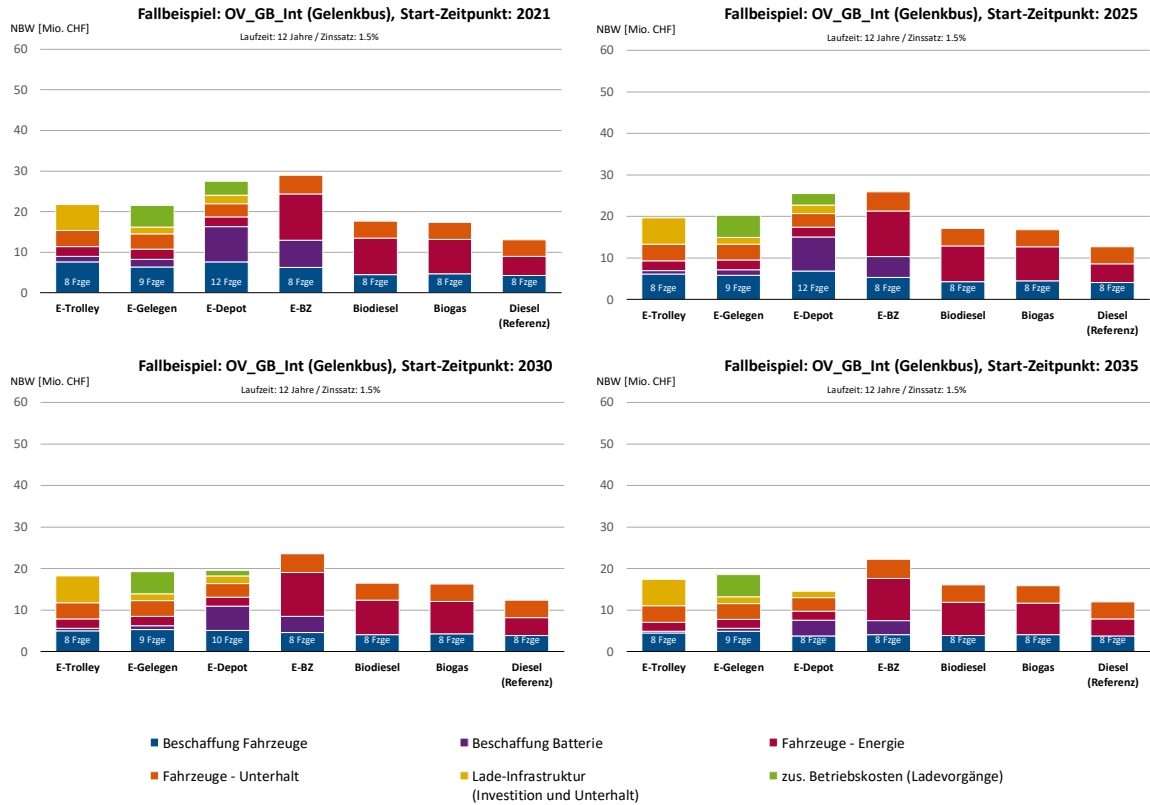
		Kleinbus (<9 m)				
	Einheit	Konventioneller Dieselbus (Euro VI)	Biodieselbus (Euro VI)	Biogasbus	Batterieelektrischer Bus (Depotlader)	Brennstoffzellenbus (H2)
Basisjahr	-	2020	2020	2020	2020	2020
Energiebedarf						
Energiebedarf (ohne Strom)	kWh/km	2.00	2.00	2.60	0.00	1.59
Energiededarf (nur für Info)	l/km	0.20	0.22	0.20	0.00	0.05
Energiebedarf (Strom Anteil)	kWh/km	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00
Energieanteil (km basis)						
Diesel	%	90%	0%	0%	0%	0%
Biodiesel	%	10%	100%	0%	0%	0%
Gas	%	0%	0%	0%	0%	0%
Biogas	%	0%	0%	100%	0%	0%
Strom	%	0%	0%	0%	100%	0%
Wasserstoff	%	0%	0%	0%	0%	100%

A6.3. Emissionsfaktoren

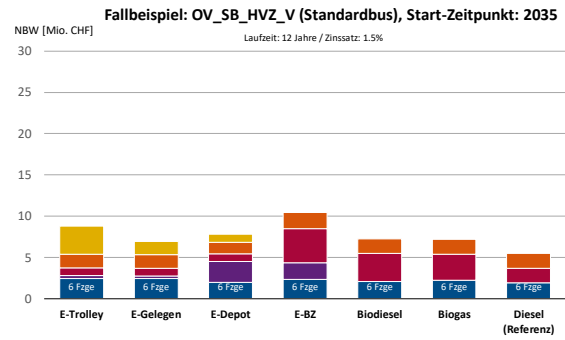
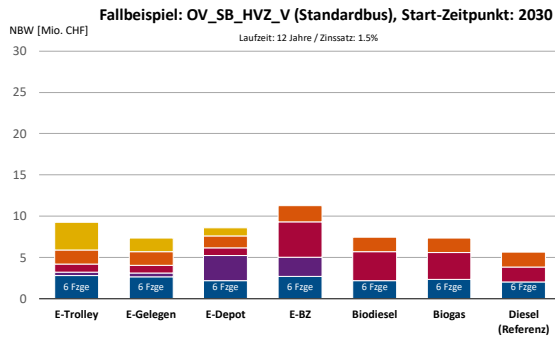
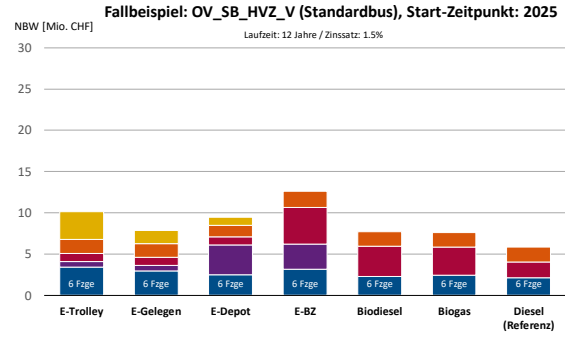
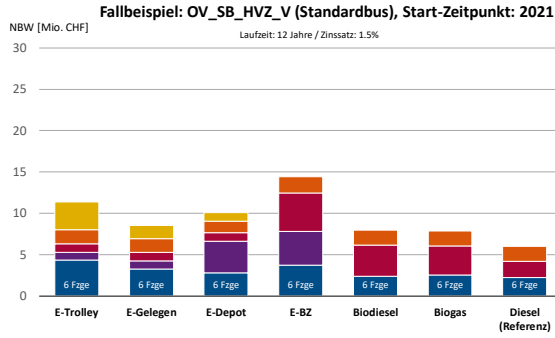
		Climate change (IPCC 2013) GWP		Quelle
		100 kg CO2 eq	Cumulative Energy demand total MJ	
Lithium ion battery production and end of life	kg system	10.8		170 Cox et al. 2020, Zurich Project, Calculator
Biodiesel (from used cooking oil)	kg	0.41		6.20 Cozzolino F. (2018) Life Cycle assessment of Biofuel
Diesel	kg	0.520153		55.019156 Ecoinvent 3.6
CNG	kg	0.498106		58.57161 Ecoinvent 3.6
Biogas	kg	2.291010602		13.226 Ecoinvent 3.6
Hydrogen (from renewable electricity)	kg	2.85		265 Cox and Bauer 2017
Electricity (Swiss consumption mix)	kWh	0.105905		7.953119 Ecoinvent 3.6
Electricity)(Swiss label certified mix)	kWh	0.020432		4.56843 Ecoinvent 3.6
Bus (without battery, FC or powertrain) production and EoL	kg	6.392755		90.882219 Ecoinvent 3.6
Fuel cell system	kg	10.1		149.1 Cox and Bauer 2017, Simons and Bauer 2015
Bus electric powertrain production and EoL	kg	19.517397		263.354057 Ecoinvent 3.6
Bus conventional powertrain production and EoL	kg	8.090777		111.304879 Ecoinvent 3.6
Hydrogen tank (350 Bar)	kg	30.268		556.62 Cox and Bauer 2017
Pantograph production and EoL	kg	4		60 Ecoinvent 3.6
Bus powertrain production impacts				
Konventioneller Dieselmotor (Euro VI)	kg	8.090777		111.304879 Ecoinvent 3.6
Biodieselmotor (Euro VI)	kg	8.090777		111.304879 Ecoinvent 3.6
Gasbus (CNG/LNG)	kg	8.090777		111.304879 Ecoinvent 3.6
Biogasbus	kg	8.090777		111.304879 Ecoinvent 3.6
Diesel-Hybridbus (Euro VI)	kg	13.804087		187.329468 Ecoinvent 3.6
Biodiesel-Hybridbus (Euro VI)	kg	13.804087		187.329468 Ecoinvent 3.6
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)	kg	19.517397		263.354057 Ecoinvent 3.6
Batterieelektrischer Bus (Gelegenheitslader)	kg	19.517397		263.354057 Ecoinvent 3.6
Batterieelektrischer Bus (Kombilader)	kg	19.517397		263.354057 Ecoinvent 3.6
Trolleybus	kg	19.517397		263.354057 Ecoinvent 3.6
Plug-in-Hybridbus (Diesel/Elektrisch)	kg	13.804087		187.329468 Ecoinvent 3.6
Plug-in-Hybridbus (Gas/Elektrisch)	kg	13.804087		187.329468 Ecoinvent 3.6
Brennstoffzellenbus (H2)	kg	19.517397		263.354057 Ecoinvent 3.6
Plug-in-Hybridbus (H2/Elektrisch)	kg	19.517397		263.354057 Ecoinvent 3.6
Treibhausgasemission der Stromerzeugung:				
Stromerzeugung:				
Schweizer Konsummix	kWh	0.11		7.95 Ecoinvent 3.6
Schweizer Erneuerbaremix	kWh	0.02		4.57 Ecoinvent 3.6
Import aus Europa	kWh	0.41		10.61 Ecoinvent 3.6(ENTSO-E)
Wind offshore	kWh	0.03		4.59
Wind (CH)	kWh	0.03		4.66
Solar PV	kWh	0.08		5.34
Biomasse (Holz)	kWh	0.08		17.18 Ecoinvent 3.6. Berücksichtigt ist die
Biogas	kWh	0.30		1.08 Stromproduktion sowie Transport und
Erdgas CHP	kWh	0.68		10.81 Transformation zu Niederspannung gem.
Erdgas Kombikraftwerk	kWh	0.43		7.86 ecoinvent 3.6
Wasserkraft (Staudamm)	kWh	0.01		4.28
Wasserkraft (Fluss-Laufkraftwerk)	kWh	0.01		4.26
Nuklear	kWh	0.02		14.82
Wasserstoffproduktion				
Dampfreformierung (fossil)	kWh H2	0.33		184.00 Bhandari 2012
Elektrolyse	kWh H2			
THG Emission der Elektrolyseproduktion	kWh H2	0.00201		0.02983 approximation

A7. Detaillierergebnisse zu den Kostenrechnungen

Fallbeispiel Ortsverkehr/Gelenkbus/Integrale Taktstruktur

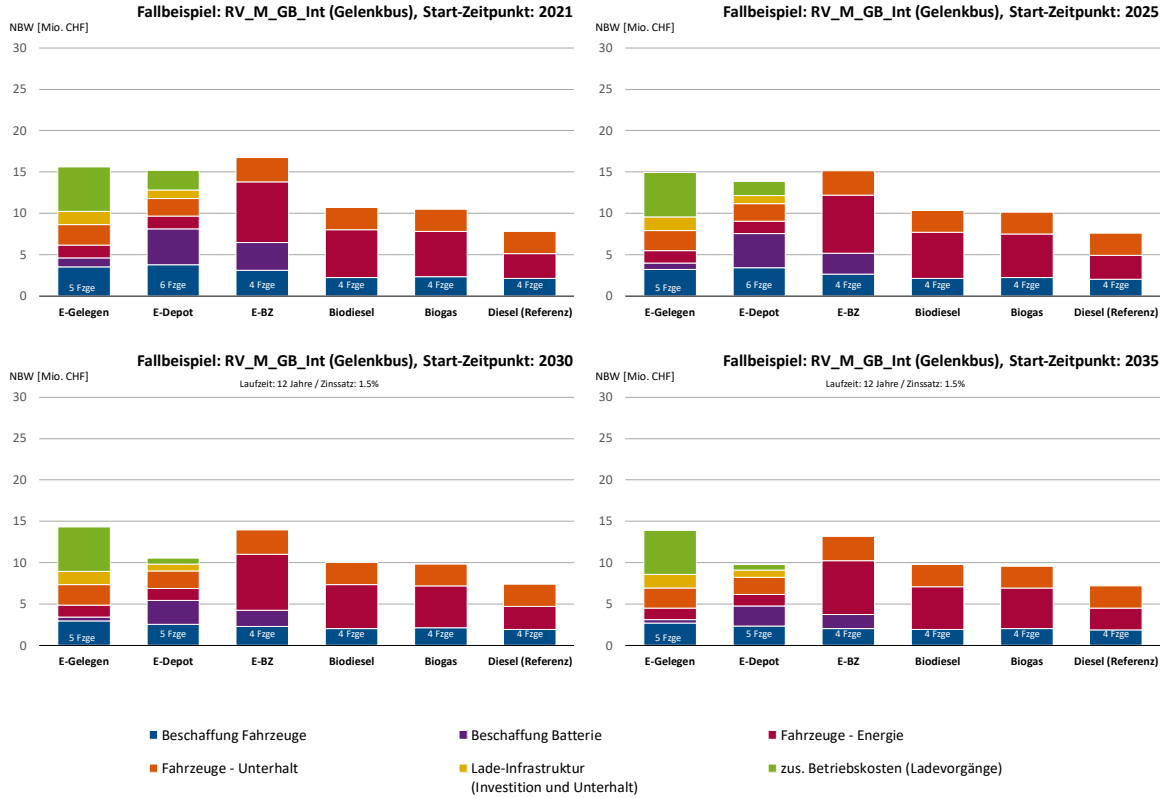


Fallbeispiel Ortsverkehr/Standardbus/Taktstruktur mit HVZ-Verdichtungen



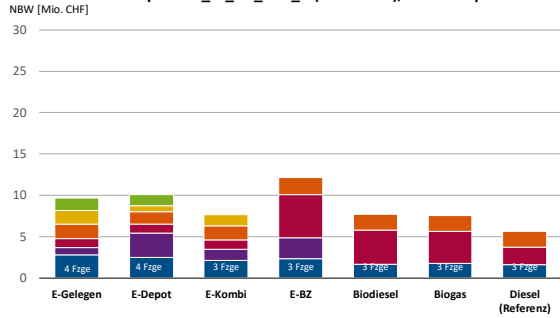
- Beschaffung Fahrzeuge
- Beschaffung Batterie
- Fahrzeuge - Energie
- Fahrzeuge - Unterhalt
- Lade-Infrastruktur (Investition und Unterhalt)
- zus. Betriebskosten (Ladevorgänge)

Fallbeispiel Regionalverkehr-Mittelland/Gelenkbus/Integrale Taktstruktur

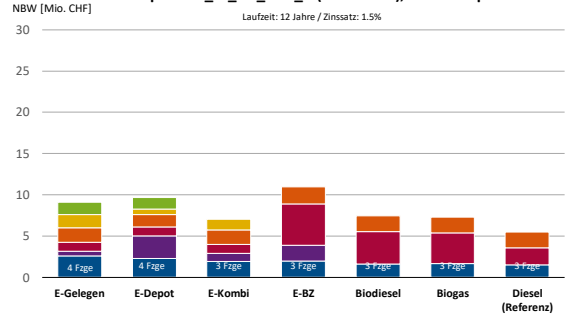


Fallbeispiel Regionalverkehr-Mittelland/Gelenkbus/Taktstruktur mit HVZ-Verdichtungen

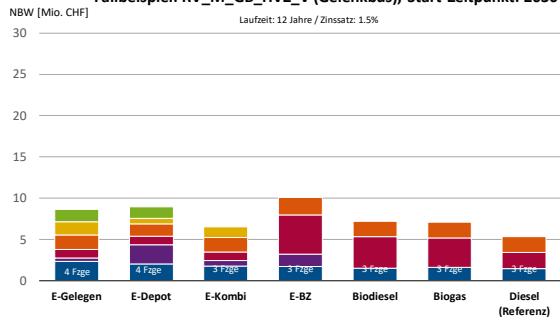
Fallbeispiel: RV_M_GB_HVZ_V (Gelenkbus), Start-Zeitpunkt: 2021



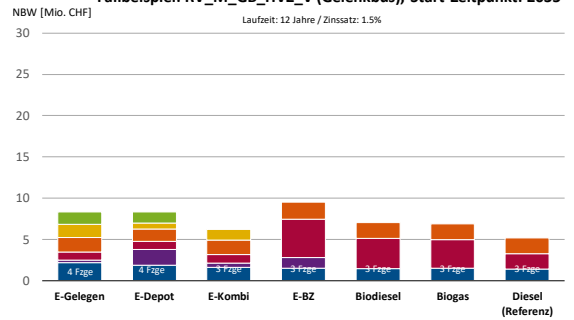
Fallbeispiel: RV_M_GB_HVZ_V (Gelenkbus), Start-Zeitpunkt: 2025



Fallbeispiel: RV_M_GB_HVZ_V (Gelenkbus), Start-Zeitpunkt: 2030

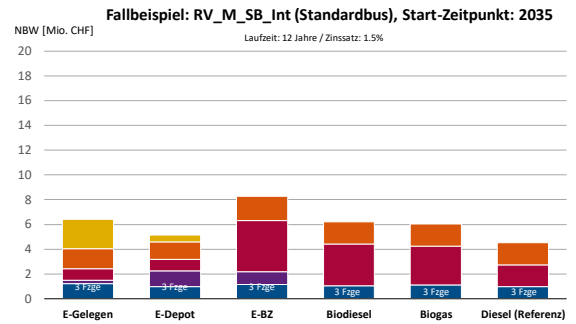
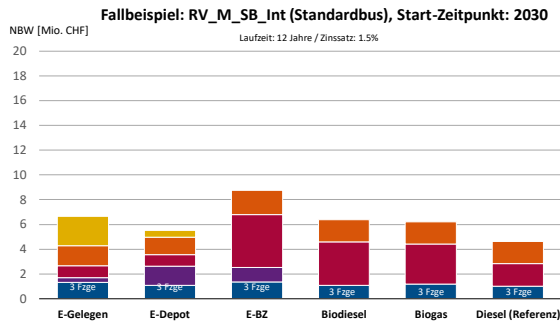
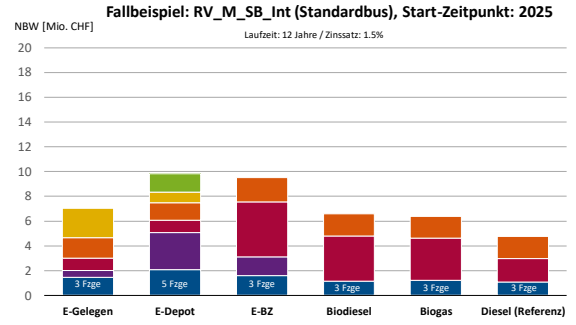
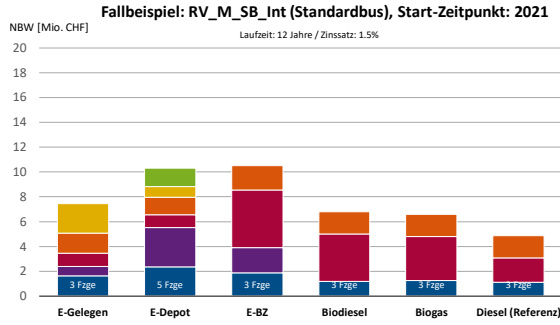


Fallbeispiel: RV_M_GB_HVZ_V (Gelenkbus), Start-Zeitpunkt: 2035



- Beschaffung Fahrzeuge
- Beschaffung Batterie
- Fahrzeuge - Energie
- Fahrzeuge - Unterhalt
- Lade-Infrastruktur (Investition und Unterhalt)
- zus. Betriebskosten (Ladevorgänge)

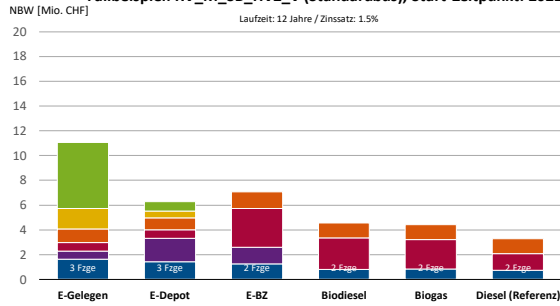
Fallbeispiel Regionalverkehr-Mittelland/Standardbus/Integrale Taktstruktur



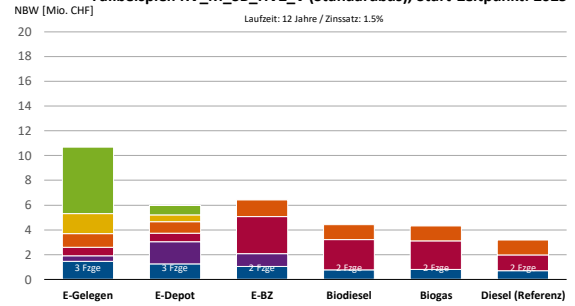
- Beschaffung Fahrzeuge
- Beschaffung Batterie
- Fahrzeuge - Energie
- Fahrzeuge - Unterhalt
- Lade-Infrastruktur (Investition und Unterhalt)
- zus. Betriebskosten (Ladevorgänge)

Fallbeispiel Regionalverkehr-Mittelland/ Standardbus /Taktstruktur mit HVZ-Verdichtungen

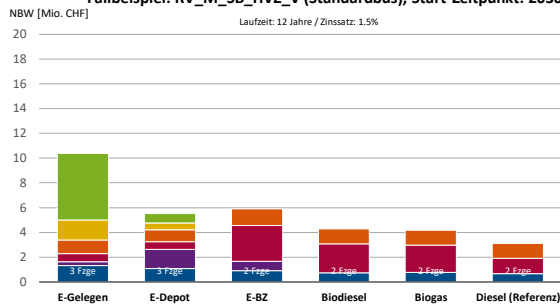
Fallbeispiel: RV_M_SB_HVZ_V (Standardbus), Start-Zeitpunkt: 2021



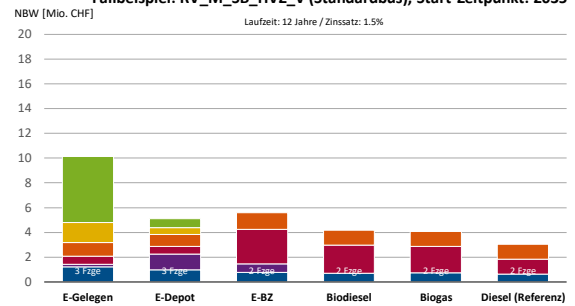
Fallbeispiel: RV_M_SB_HVZ_V (Standardbus), Start-Zeitpunkt: 2025



Fallbeispiel: RV_M_SB_HVZ_V (Standardbus), Start-Zeitpunkt: 2030

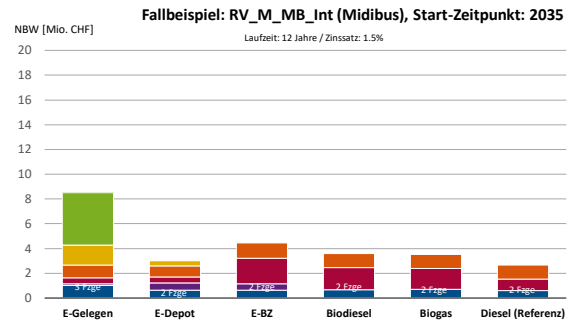
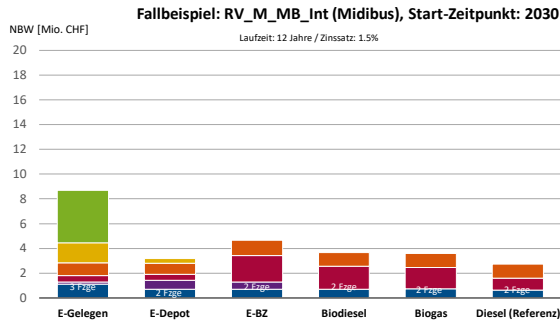
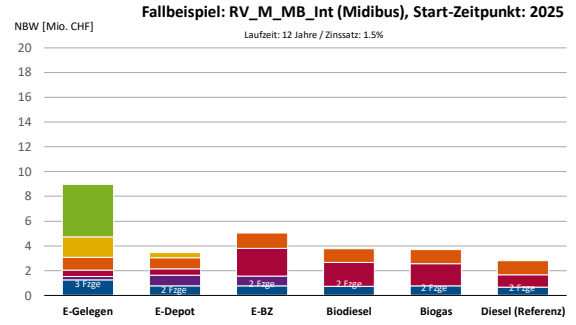
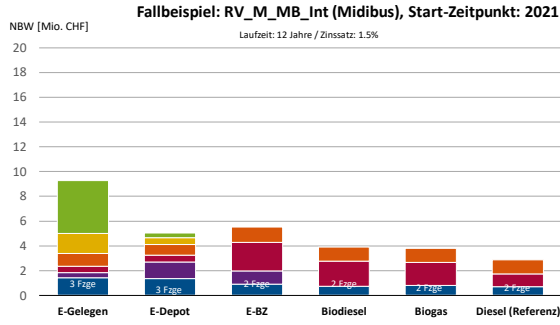


Fallbeispiel: RV_M_SB_HVZ_V (Standardbus), Start-Zeitpunkt: 2035



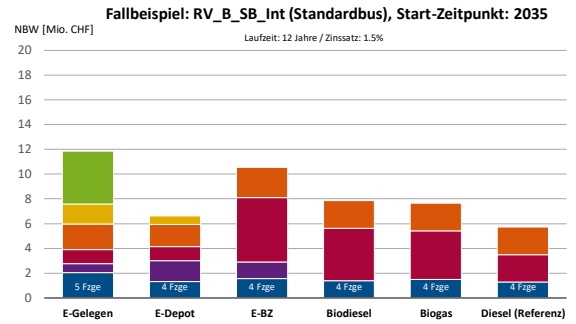
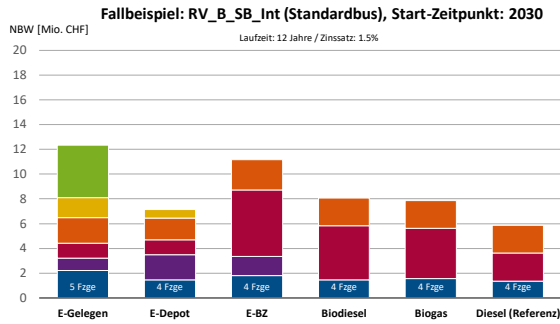
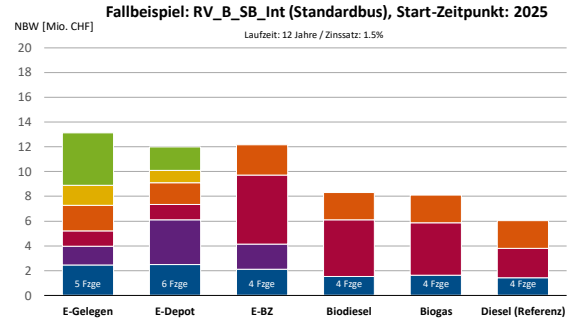
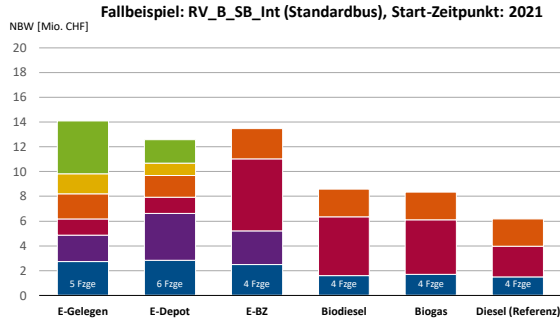
- Beschaffung Fahrzeuge
- Beschaffung Batterie
- Fahrzeuge - Energie
- Fahrzeuge - Unterhalt
- Lade-Infrastruktur (Investition und Unterhalt)
- zus. Betriebskosten (Ladevorgänge)

Fallbeispiel Regionalverkehr-Mittelland/Midibus/Integrale Taktstruktur



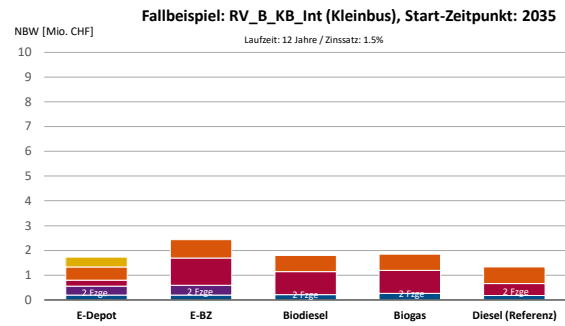
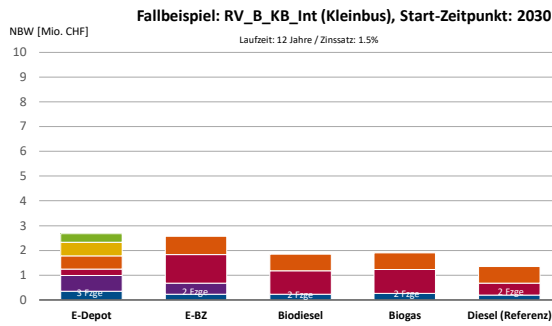
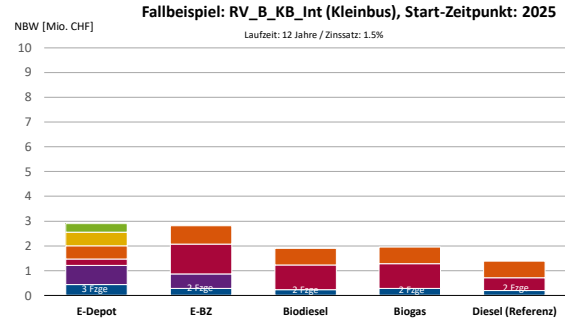
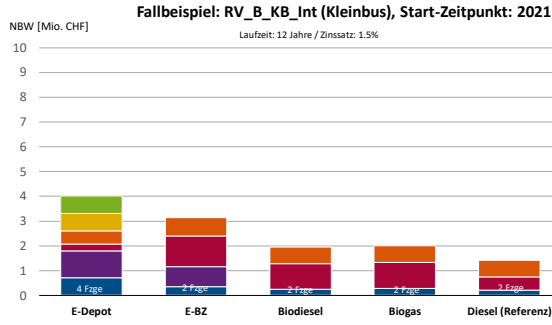
- Beschaffung Fahrzeuge
- Beschaffung Batterie
- Fahrzeuge - Energie
- Fahrzeuge - Unterhalt
- Lade-Infrastruktur (Investition und Unterhalt)
- zus. Betriebskosten (Ladevorgänge)

Fallbeispiel Regionalverkehr-Berggebiet/Standardbus/Integrale Taktstruktur



- Beschaffung Fahrzeuge
- Beschaffung Batterie
- Fahrzeuge - Energie
- Fahrzeuge - Unterhalt
- Lade-Infrastruktur (Investition und Unterhalt)
- zus. Betriebskosten (Ladevorgänge)

Fallbeispiel Regionalverkehr-Berggebiet/Kleinbus/Integrale Taktstruktur



- Beschaffung Fahrzeuge
- Beschaffung Batterie
- Fahrzeuge - Energie
- Fahrzeuge - Unterhalt
- Lade-Infrastruktur (Investition und Unterhalt)
- zus. Betriebskosten (Ladevorgänge)

A8. Annahmen zu Batteriebus-Mix für die Hochrechnung der Mehrkosten

RPV – Szenario «maximal»

Zeithorizont 2021/2025							
		30%		15%		30%	10%
		Gelenkbus					
Antriebsoption		Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen				zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse	
				ja nein		ja nein	
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)		0%	0%	30%	15%	30%	10%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option				15%	15%	50%	20%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug							24%

Zeithorizont 2021/2025							
		30%		15%		30%	10%
		Standardbus					
Antriebsoption		Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen				zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse	
				ja nein		ja nein	
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)		0%	0%	30%	15%	30%	10%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option				15%	15%	50%	20%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug							24%

Zeithorizont 2021/2025							
		65%		15%		25%	10%
		Midibus					
Antriebsoption		Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen				zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse	
				ja nein		ja nein	
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)		0%	0%	65%	15%	25%	10%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option				0%	15%	60%	25%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug							20%

Zeithorizont 2021/2025							
		30%		15%			
		Kleinbus					
Antriebsoption		Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen						zusätzliche Busse	
						ja nein	
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)		0%	0%	0%	0%	30%	15%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option						60%	40%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug							24%

Zeithorizont 2030/2035							
		30%		7%		20%	7%
		Gelenkbus					
Antriebsoption		Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen				zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse	
				ja nein		ja nein	
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)		0%	0%	30%	7%	20%	7%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option					20%	15%	65%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug							9%

Zeithorizont 2030/2035							
		20%		7%		20%	7%
		Standardbus					
Antriebsoption		Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen				zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse	
				ja nein		ja nein	
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)		0%	0%	20%	7%	20%	7%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option					20%	15%	65%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug							9%

Zeithorizont 2030/2035							
		65%		25%		20%	5%
		Midibus					
Antriebsoption		Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen				zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse	
				ja nein		ja nein	
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)		0%	0%	65%	25%	20%	5%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option				0%	5%	15%	80%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug							8%

Zeithorizont 2030/2035							
		25%		8%			
		Kleinbus					
Antriebsoption		Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen						zusätzliche Busse	
						ja nein	
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)		0%	0%	0%	0%	25%	8%
Anteil Fahrzeuge						10%	90%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug							10%

RPV – Szenario «realistisch»

Zeithorizont 2021/2025									
		30%		15%		30%		10%	
	Gelenkbus								
Antriebsoption	Batterietrolley			Gelegenheitslader statisch		Depotlader			
Rahmenbedingungen				zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse			
				ja	nein	ja	nein		
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	30%	15%	30%	10%			
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option			0%	30%	0%	70%			
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug									12%

Zeithorizont 2021/2025									
		30%		15%		30%		10%	
	Standardbus								
Antriebsoption	Batterietrolley			Gelegenheitslader statisch		Depotlader			
Rahmenbedingungen				zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse			
				ja	nein	ja	nein		
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	30%	15%	30%	10%			
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option			0%	30%	0%	70%			
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug									12%

Zeithorizont 2021/2025									
		65%		15%		25%		10%	
	Midibus								
Antriebsoption	Batterietrolley			Gelegenheitslader statisch		Depotlader			
Rahmenbedingungen				zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse			
				ja	nein	ja	nein		
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	65%	15%	25%	10%			
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option			0%	30%	0%	70%			
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug									12%

Zeithorizont 2021/2025									
		30%		15%					
	Kleinbus								
Antriebsoption	Batterietrolley			Gelegenheitslader statisch		Depotlader			
Rahmenbedingungen						zusätzliche Busse			
						ja	nein		
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	0%	0%	30%	15%			
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option					0%	100%			
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug									15%

Zeithorizont 2030/2035									
		30%		7%		20%		7%	
	Gelenkbus								
Antriebsoption	Batterietrolley			Gelegenheitslader statisch		Depotlader			
Rahmenbedingungen				zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse			
				ja	nein	ja	nein		
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	30%	7%	20%	7%			
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option				20%	0%	80%			
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug									7%

Zeithorizont 2030/2035									
		20%		7%		20%		7%	
	Standardbus								
Antriebsoption	Batterietrolley			Gelegenheitslader statisch		Depotlader			
Rahmenbedingungen				zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse			
				ja	nein	ja	nein		
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	20%	7%	20%	7%			
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option				20%	0%	80%			
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug									7%

Zeithorizont 2030/2035									
		65%		25%		20%		5%	
	Midibus								
Antriebsoption	Batterietrolley			Gelegenheitslader statisch		Depotlader			
Rahmenbedingungen				zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse			
				ja	nein	ja	nein		
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	65%	25%	20%	5%			
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option			0%	0%	0%	100%			
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug									5%

Zeithorizont 2030/2035									
		25%		8%					
	Kleinbus								
Antriebsoption	Batterietrolley			Gelegenheitslader statisch		Depotlader			
Rahmenbedingungen						zusätzliche Busse			
						ja	nein		
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	0%	0%	25%	8%			
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option					0%	100%			
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug									8%

Ortsverkehr – Szenario «maximal»

Zeithorizont 2021/2025						
Mehrkosten mit MinöSt-Rückerst.						
	20%		15%		20%	
	15%		20%		35%	
	20%		15%		20%	
	Gelenkbus					
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse	
	30%	15%	ja	nein	ja	nein
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	20%	15%	20%	15%	35%	20%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option	5%	5%	15%	15%	30%	30%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug						24%

Mehrkosten mit MinöSt-Rückerst.						
	25%		20%		20%	
	20%		15%		35%	
	20%		15%		20%	
	Standardbus					
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse	
	30%	15%	ja	nein	ja	nein
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	25%	20%	20%	15%	35%	20%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option	0%	0%	20%	20%	30%	30%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug						24%

Mehrkosten mit MinöSt-Rückerst.						
	65%		15%		25%	
	10%		15%		25%	
	10%		15%		10%	
	Midibus					
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse	
	30%	15%	ja	nein	ja	nein
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	65%	15%	25%	10%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option	0%	0%	0%	15%	40%	45%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug						17%

Mehrkosten mit MinöSt-Rückerst.						
	30%		15%		15%	
	15%		15%		15%	
	15%		15%		15%	
	Kleinbus					
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse	
	30%	15%	ja	nein	ja	nein
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	0%	0%	30%	15%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option	0%	0%	0%	0%	50%	50%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug						23%

Zeithorizont 2030/2035						
Mehrkosten mit MinöSt-Rückerst.						
	15%		10%		20%	
	10%		8%		20%	
	20%		8%		20%	
	Gelenkbus					
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse	
	30%	15%	ja	nein	ja	nein
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	15%	10%	20%	8%	20%	7%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option	5%	5%	0%	20%	10%	60%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug						9%

Mehrkosten mit MinöSt-Rückerst.						
	20%		15%		20%	
	15%		8%		20%	
	20%		8%		20%	
	Standardbus					
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse	
	30%	15%	ja	nein	ja	nein
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	20%	15%	20%	8%	20%	8%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option	0%	0%	0%	20%	10%	70%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug						9%

Mehrkosten mit MinöSt-Rückerst.						
	65%		15%		20%	
	5%		15%		20%	
	5%		15%		5%	
	Midibus					
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse	
	30%	15%	ja	nein	ja	nein
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	65%	15%	20%	5%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option	0%	0%	0%	5%	15%	80%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug						8%

Mehrkosten mit MinöSt-Rückerst.						
	25%		15%		8%	
	15%		15%		8%	
	15%		15%		8%	
	Kleinbus					
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader	
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse	
	30%	15%	ja	nein	ja	nein
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	0%	0%	25%	8%
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option	0%	0%	0%	0%	10%	90%
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug						10%

Ortsverkehr – Szenario «realistisch»

Zeithorizont 2021/2025												
	20%		15%		20%		15%		35%		20%	
	Gelenkbus											
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader							
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse							
	30%	15%	ja	nein	ja	nein						
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	20%	15%	20%	15%	35%	20%						
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option	5%	5%	0%	30%	0%	60%						
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug											18%	
Zeithorizont 2021/2025												
	25%		20%		20%		15%		35%		20%	
	Standardbus											
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader							
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse							
	30%	15%	ja	nein	ja	nein						
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	25%	20%	20%	15%	35%	20%						
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option	0%	0%	0%	40%	0%	60%						
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug											18%	
Zeithorizont 2021/2025												
	65%		15%		25%		10%					
	Midibus											
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader							
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse							
			ja	nein	ja	nein						
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	65%	15%	25%	10%						
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option			0%	30%	0%	70%						
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug											12%	
Zeithorizont 2021/2025												
	30%		15%									
	Kleinbus											
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader							
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse							
					ja	nein						
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	0%	0%	30%	15%						
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option					0%	100%						
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug											15%	
Zeithorizont 2030/2035												
	15%		10%		20%		8%		20%		7%	
	Gelenkbus											
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader							
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse							
	30%	15%	ja	nein	ja	nein						
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	15%	10%	20%	8%	20%	7%						
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option	5%	5%	0%	20%	0%	70%						
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug											8%	
Zeithorizont 2030/2035												
	20%		15%		20%		8%		20%		8%	
	Standardbus											
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader							
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse							
	30%	15%	ja	nein	ja	nein						
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	20%	15%	20%	8%	20%	8%						
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option	0%	0%	0%	20%	0%	80%						
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug											8%	
Zeithorizont 2030/2035												
	65%		15%		20%		5%					
	Midibus											
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader							
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse							
			ja	nein	ja	nein						
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	65%	15%	20%	5%						
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option			0%	15%	0%	85%						
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug											7%	
Zeithorizont 2030/2035												
	25%		8%									
	Kleinbus											
Antriebsoption	Batterietrolley		Gelegenheitslader statisch		Depotlader							
Rahmenbedingungen	Streckenanteil mit neuer OL		zusätzlicher Umlauf		zusätzliche Busse							
					ja	nein						
Mehrkosten relativ (Ergebnisse Fallstudien)	0%	0%	0%	0%	25%	8%						
Annahme Anteil Fahrzeuge je Option					0%	100%						
Durchschnittliche Mehrkosten pro Fahrzeug											8%	

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: In der TU-Umfrage erfasste Transportunternehmen und Anzahl Busse (Stand Januar 2020)	48
Abbildung 2: Verteilung der Diesel-Busse in der Schweiz auf verschiedene Busgrößen (RPV & Ortsverkehr)	49
Abbildung 3: Größenordnungen zu Fahrzeuglängen und Beförderungskapazitäten verschiedener Busgrößen	49
Abbildung 4: Buseinsatz nach Verkehrssparte	50
Abbildung 5: Alter der heute eingesetzten Busse	51
Abbildung 6: Fahrzeuge nach Abgasnorm	52
Abbildung 7: Übersicht über die Fahrzeugersatzbeschaffungen nach Sparte und Busgröße gemäss TU-Umfrage	53
Abbildung 8: Anzahl Linien nach Linienlänge für RPV und Ortsverkehr	54
Abbildung 9: Anzahl Linien nach Fahrzeuggrößen für RPV und Ortsverkehr	54
Abbildung 10: Übersicht und Auswahl der Antriebsoptionen und Treibstoffe	58
Abbildung 11: Entwicklung der realen Reichweite von Batteriebusen mit Depotladekonzept	61
Abbildung 12: Anschaffungskosten der Antriebsoptionen im Zeitverlauf	67
Abbildung 13: Primärenergiebedarf der Herstellung und Entsorgung der Antriebsoptionen im Zeitverlauf	68
Abbildung 14: Treibhausgasemission der Herstellung und Entsorgung der Antriebsoptionen im Zeitverlauf	68
Abbildung 15: Einschätzung der Antriebsoptionen aus technischer und betrieblicher Sicht.	73
Abbildung 16: Untersuchte Fallbeispiele	77
Abbildung 17: Übersicht über die in der Auswirkungsanalyse gerechneten Antriebsoptionen	78
Abbildung 18: Mehrkosten im Orts-/Agglomerationsverkehr ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung)	89
Abbildung 19: Mehrkosten im Orts-/Agglomerationsverkehr ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung)	91
Abbildung 20: Mehrkosten im Orts-/Agglomerationsverkehr ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung)	92
Abbildung 21: Mehrkosten im Orts-/Agglomerationsverkehr ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung)	93
Abbildung 22: Mehrkosten im Regionalverkehr-Mittelland ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung)	96

Abbildung 23: Mehrkosten im Regionalverkehr-Mittelland ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung) _____	97
Abbildung 24: Mehrkosten im Regionalverkehr-Berggebiet ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung) _____	99
Abbildung 25: Mehrkosten im Regionalverkehr-Berggebiet ggü. Dieselbus Euro 6 (Vollkostenbetrachtung) _____	100
Abbildung 26: Treibhausgasreduktionspotenzial fossilfreier Antriebsoptionen gegenüber Dieselbus (=100%) _____	103
Abbildung 27: Primärenergieverbrauch fossilfreier Antriebsoptionen gegenüber Dieselbus (=100%) _____	105
Abbildung 28: Luftschadstoff-Emissionen fossilfreier Antriebsoptionen im Betrieb ggü. Dieselbus (=100%) _____	107
Abbildung 29: Reduktionskosten pro Tonne CO ₂ -Äquivalent kurz/langfristig, mit/ohne MinöSt- Rückerstattung _____	110
Abbildung 30: Qualitative Bewertung weiterer Kriterien _____	111
Abbildung 31: Bewertungsprofile der untersuchten fossilfreien Antriebsoptionen _____	117
Abbildung 32: Übersicht Prozesse und Rahmenbedingungen Finanzierung öffentlicher Verkehr _____	120
Abbildung 33: Zuständigkeiten Konzessionierung und Bestellung / Finanzierung im ÖV _____	122
Abbildung 34: Ablauf Bestellverfahren RPV _____	123
Abbildung 35: Einordnung _____	157
Abbildung 36: Einführungsprozess Elektrobusse _____	170
Abbildung 37: Maximales Potenzial für Dieselbusersatz durch Batteriebusse im RPV _____	176
Abbildung 38: Maximales Potenzial für Dieselbusersatz durch Batteriebusse im Ortsverkehr _	176
Abbildung 39: Anteil fossilfreie Batteriebusse am Total zu ersetzender Diesel-Busse je Jahr im Szenario "realistisch" _____	177
Abbildung 40: Realistisches Potenzial für Batteriebusse im Regionalen Personenverkehr (RPV)	178
Abbildung 41: Realistisches Potenzial für Batteriebusse im Ortsverkehr _____	178
Abbildung 42: Jährliche Mehrkosten bei Umstellung von Dieselbussen auf Batteriebusse – Basisrechnung (Grobschätzung mit MinöSt-Rückerstattung) _____	180
Abbildung 43: Jährliche Mehrkosten bei Umstellung von Dieselbussen auf Batteriebusse – Sensitivität (Grobschätzung mit MinöSt-Rückerstattung) _____	181
Abbildung 44: Jährliche Mehrkosten bei Umstellung von Dieselbussen auf Batteriebusse – Sensitivität (Grobschätzung mit MinöSt-Rückerstattung) _____	182
Abbildung 45: CO ₂ -Reduktionspotenzial einer Umstellung von Dieselbussen auf Batteriebusse	183

Abbildung 46: Maximales, theoretisches finanzielles Potenzial des Programms myclimate/KliK des Instruments CO ₂ -Kompensationspflicht Treibstoffimporteure im RPV + OV bei einem Beitrag von 200 CHF/tCO ₂ p.a. für Elektrobusse _____	186
Abbildung 47: Geschätztes realistisches, finanzielles Potenzial des Programms myclimate/KliK des Instruments CO ₂ -Kompensationspflicht Treibstoffimporteure im RPV + OV bei einem Beitrag von 200 CHF/tCO ₂ p.a. für Elektrobusse _____	187
Abbildung 48: Geschätztes finanzielles Potenzial der Bundesbeiträge aus dem PAV im OV p.a., inkl. Mineralölsteuerrückerstattung KTU _____	188
Abbildung 49: Geschätztes finanzielles Potenzial des Programms myclimate / KliK des Instruments CO ₂ -Kompensationspflicht Treibstoffimporteure und des PAV im RPV und OV p.a., inkl. Mineralölsteuerrückerstattung KTU _____	189
Abbildung 50: Finanzierungsbedarf unter Berücksichtigung nationaler Fördermassnahmen im RPV und OV, inkl. Mineralölsteuerrückerstattung _____	190
Abbildung 51: Entwicklung der durch Förderbeiträge gedeckten sowie ungedeckten Mehrkosten (CO ₂ -Kompensationspflicht Treibstoffimporteure / myclimate/KliK + PAV) für RPV+OV (inkl. Mineralölsteuerrückerstattung KTU) _____	191
Abbildung 52: Mögliche Aufteilung Finanzierungsbedarf gemäss der ordentlichen ÖV-Finanzierung (RPV+OV), inkl. Mineralölsteuerrückerstattung _____	192
Abbildung 53: Zusammensetzung Kathodenpulver von unterschiedlichen Zelltypen _____	199
Abbildung 54: Entwicklung spezifische Batteriekosten für Elektrobusse _____	200
Abbildung 55: Entwicklung spezifische Batteriekapazität für Elektrobusse _____	200
Abbildung 56: Nutzbare Energie einer geladenen Batterie _____	201
Abbildung 57: Prozesse zur Herstellung einer Lithiumbatterie (LiMn ₂ O ₄ /Graphit) für Elektromobilität _____	205
Abbildung 58: Kritikalitätsmatrix gemäss Europäischer Kommission _____	207
Abbildung 59: Anteile der globalen Kobalt Produktion in 2011 _____	208
Abbildung 60: Entwicklung des Kobaltpreises ab 2005 (in \$/lb) _____	209
Abbildung 61: Spezifische Kosten für Brennstoffzellen und Wasserstofftanks im Zeitverlauf __	215
Abbildung 62: Spezifische Massen für Brennstoffzellen und Wasserstofftanks im Zeitverlauf _	215
Abbildung 63: Maximaler Roll- und Antriebslärm von schweren (Lorry) und leichten (passenger car) Strassenfahrzeugen. _____	221
Abbildung 64: Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit _____	222

Tabellenverzeichnis

Tabelle Z-1: Finanzierung bzw. Fördermöglichkeiten von Fahrzeugen und Antriebstechnologien	13
Tableau Z-1 : instruments de financement ou de promotion de véhicules et de technologies d'entraînement	26
Tabella Z-1: finanziamento o possibilità di promozione di veicoli e tecnologia di propulsione	40
Tabelle 2: Vollkosten und Abgeltungen 2019 für die RPV-Linien (Vollerhebung)	55
Tabelle 3: Vollkosten und Abgeltungen 2019 für die Ortlinien gemäss TU-Umfrage (Stichprobe)	55
Tabelle 4: Allgemeine Linienkennzahlen zu den Fallbeispielen Ortsverkehr	79
Tabelle 5: Spezifikation Batteriebusse für Einsatz im Ortsverkehr	80
Tabelle 6: Allgemeine Linienkennzahlen zu den Fallbeispielen Regionalverkehr Mittelland	81
Tabelle 7: Spezifikation Batteriebusse für Einsatz im Regionalverkehr Mittelland: Gelenkbusse	82
Tabelle 8: Spezifikation Batteriebusse für Einsatz im Regionalverkehr Mittelland: Standard- und Midibusse	83
Tabelle 9: Allgemeine Linienkennzahlen zu den Fallbeispielen Regionalverkehr-Berggebiet	84
Tabelle 10: Spezifikation Batteriebusse für Einsatz im Regionalverkehr-Berggebiet	85
Tabelle 11: Systematisierung von nachfrageseitigen Fördermassnahmen ÖV	119
Tabelle 12: Finanzierung öffentlicher Verkehr durch die öffentliche Hand	125
Tabelle 13: Rückerstattung Mineralölsteuer für Fahrten mit Strassenfahrzeugen zum Zweck der Personenbeförderung mit einer Konzession des Bundes	128
Tabelle 14: Förderung von Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekten (BFE)	130
Tabelle 15: CO ₂ -Kompensationspflicht der Treibstoffimporteure gemäss CO ₂ -Gesetz	133
Tabelle 16: Klimastiftung Schweiz	135
Tabelle 17: Finanzielle Förderungen für einen fossilfreien ÖV (Stand 2019)	137
Tabelle 18: Förderprogramm «Erneuerbare Energien und Energieeffizienz»	140
Tabelle 19: Förderprogramm 2000-Watt-Gesellschaft (Zürich / Graubünden)	155
Tabelle 20: Übersicht bestehender Finanzierung im ÖV und Fördermassnahmen	158
Tabelle 21: Finanzierung bzw. Fördermöglichkeiten von Fahrzeugen und Antriebstechnologien	159
Tabelle 22: Stärken und Schwächen der Instrumente bzw. Fördermassnahmen	160
Tabelle 23: Überblick Fallstudien Ausland	165
Tabelle 24: Beschaffungsoptionen für Elektrobusse	171
Tabelle 25: Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten Elektrobusse international	172
Tabelle 26: Zusammensetzung Li-Zelle (NMC)	198
Tabelle 27: Vergleich Batteriestudien bis 2012	204

Abkürzungen

BöB	Bundesgesetz über das öffentliche Beschaffungswesen
CCS	Carbon Capture and Storage
CNG	Compressed natural gas
EEV	Enhanced Environmentally Friendly Vehicle
FAME	fatty acid methyl ester (Fettsäuremethylester)
HBEFA	Handbuch der Emissionsfaktoren
HVZ	Hauptverkehrszeiten
IMC	in motion charging
IVöB	Interkantonale Vereinbarung über das öffentliche Beschaffungswesen.
KKDöV	Konferenz der kantonalen Delegierten des öffentlichen Verkehrs
KTU	Konzessionierte Transportunternehmen
LFP	Lithium-Eisenphosphat
LNG	Liquified natural gas
LTO	Lithiumtitanat
MinöSt	Mineralölsteuer
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Coabl
NO _x	Stickoxid
ÖV	Öffentlicher Verkehr
OV	Ortsverkehr
PBG	Personenbeförderungsgesetz
QMS RPV	Qualitätsmesssystem im regionalen Personenverkehr
RPV	Regionaler Personenverkehr
SuG	Subventionsgesetz
TU	Transportunternehmen
UCO	Used Cooking-Oil
VK	Verpflichtungskredit
WtW	Well-to-Wheel

Literatur

- Althaus et al 2009a:** Althaus H.J., De Haan P. and Scholz R.W. 2009. Traffic noise in LCA Part 1: state-of-science and requirement profile for consistent context-sensitive integration of traffic noise in LCA. *International Journal of Life Cycle Assessment* 14(6): 560-570.
- Althaus et al 2009b:** Althaus H.J., De Haan P. and Scholz R.W. 2009. Traffic noise in LCA Part 2: Analysis of existing methods and proposition of a new framework for consistent, context-sensitive LCI modeling of road transport noise emission. *International Journal of Life Cycle Assessment* 14(7): 676-686.
- Althaus 2012:** Althaus H.J. 2012. Inventories and Impact Assessment for Road Transport Noise in Generic Life cycle assessments. Diss. ETH No 20546 ETH Zürich, Zürich.
- Althaus 2013 (Conf):** Althaus H.J. Comparison of LCA Studies on Li-Ion Batteries. NAREP-Seminar, Dübendorf.
- Althaus et al 2015:** Althaus H.J., Duschmalé J. and Fries N. 2015, Cleantech Ressourcenstrategie. Foundation for global sustainability, Zürich, CH. www.swisscleantech.ch/Ressourcenstrategie DOI: 10.13140/RG.2.1.2651.7529.
- ARE 2020a:** Richtlinien Programm Agglomerationsverkehr (RPAV), Bern, 13. Februar 2020.
- ARE 2020b:** Externe Kosten und Nutzen des Verkehrs in der Schweiz, Strassen-, Schienen-, Luft- und Schiffsverkehr 2017, Ergebnistabellen, Juni 2020.
- Boren et al 2016:** Boren S., Nurhadi L. and Ny H. Preferences of Electric Buses in Public Transport; Conclusions from Real Life Testing in Eight Swedish Municipalities. *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering* Vol:10, No:3, 2016
- B&S 2018a:** Klauser, A. (2018) Lärmemissionen öffentlicher Verkehr. Batteriebetriebene Busse. Messbericht 2018. B+S AG, Bern im Auftrag von VBZ und Stadt Zürich
- B&S 2018b:** Klauser, A. Kindler, B., Heutschi, K. (2018) Lärmemissionen öffentlicher Verkehr. Städtischer Verkehrsbusse. Definition von Emissionswerten. B+S AG, Bern im Auftrag von BAFU, VBZ, AUE Basel, Stadt Luzern.
- BAFU 2020:** Kompensation von CO₂-Emissionen, <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/klimapolitik/kompensation-von-co2-emissionen.htm>, 2020.
- Banza Lubaba Nkulu et al. 2018:** Banza Lubaba Nkulu, C., Casas, L., Haufroid, V. et al. Sustainability of artisanal mining of cobalt in DR Congo. *Nat Sustain* 1, 495–504 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0139-4>
- Batrec 2020: Gergő Rimaszéki (2010)** Recycling von Lithium-Ionen-Batterien – nicht nur Energie- sondern auch Wertstoffspeicher. LiBa Protect Forum, Olten, 7.2.2020

- BAV 2016:** Leitfaden Bus – Zielvereinbarungen Bund/Kantone – Transportunternehmen (TU) im Rahmen des Bestellverfahrens, Stand 31. August 2016.
- BAV 2017a:** Wegleitung zur Beschaffung von Betriebsmitteln im RPV (ARPV-Genehmigung, Solidarbürgschaft des Bundes), Bundesamt für Verkehr, März 2017.
- BAV 2017b:** Merkblatt Forschung und Innovation BAV, Bundesamt für Verkehr, Dezember 2017.
- BAV 2017c:** Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESÖV 2050), Forschungsprogramm für den Zeitraum 2017–2020, 15. Juni 2017.
- BAV 2020a:** Erläuternder Bericht zum Verpflichtungskredit für die Abgeltung von Leistungen des regionalen Personenverkehrs für die Jahre 2022–2025, Bern, 2. April 2020.
- BAV 2020b:** Dank Bürgschaft des Bundes: ÖV-Unternehmen sollen weiterhin günstig Kredite aufnehmen können, Medienmitteilung des Bundesamts für Verkehr, 5. Juni 2020.
- BAV 2020c:** Reform Regionaler Personenverkehr (RPV), Bericht über die Ergebnisse der Vernehmlassung, Juni 2020.
- BFE 2016:** Faktenblatt für Pilot- und Demonstrationsprojekte: Elektrische Maschinen und Fahrzeuge, <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/forschung-und-cleantech/pilot-demonstrations-und-leuchtturmprogramm.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJKYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvODQyOQ==.html>, September 2016.
- BFE 2019:** Vollzugsweisung zur Einreichung und Evaluation von Gesuchen um Finanzhilfe für Energieforschungs-, Pilot- und Demonstrationsprojekte, Version 17.12.2019.
- Bradley et al. 2017:** Bradley, D.C., Stillings, L.L., Jaskula, B.W., Munk, LeeAnn, and McCauley, A.D., 2017, Lithium, chap. K of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. K1– K21, <https://doi.org/10.3133/pp1802K>.
- Brannigan et al. 2015:** Ex-post Evaluation of Directive 2009/33/EC on the promotion of clean and energy efficient road transport vehicles, Studie im Auftrag der Europäischen Kommission, Final Report, 21. September 2015.
- Cox et al 2018:** Cox, B., Mutel, C., Bauer, C., Mendoza Beltran, A. and van Vuuren, D. (2018). The uncertain environmental footprint of current and future battery electric vehicles, *Environmental Science & Technology*, doi:10.1021/acs.est.8b00261.
- Cox et al 2020:** Cox B., Bauer C., Mendoza Beltran A., van Vuuren DP., Mutel CL. Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. *Applied Energy*, Volume 269, 2020, 115021, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115021>.

- De Haan et al. 2017:** Förderinstrumente für effiziente Fahrzeuge: Auswirkungen auf Kauf und Nutzung von Auto, Forschungsprojekt SVI 2014/002_ENG auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI), Dezember 2017.
- Ecoplan 2012:** THG-Vermeidungskosten und -potenziale in der Schweiz, Literaturanalyse und Konzeption weitere Erhebungen, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), Schlussbericht, Bern, 7. Juni 2012.
- Erdmann und Graedel 2011:** Erdmann, L., Graedel, T.E. (2011). The Criticality of Non-Fuel Minerals: A Review of Major Approaches and Analyses. *Environmental Science & Technology* 45:7620–7630.
- EU Kommission, o.D.:** Juncker Plan and Connecting Europe Facility provide financing for electric buses in Rotterdam, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_19_5952, abgerufen am 12.03.2020, ohne Datum.
- European Commission 2010:** European Commission (2010). Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials.
- FuelCellBuses.eu o.D.:** MEHRLIN, <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/mehrlin>, abgerufen am 12.03.2020, ohne Datum.
- FuelCellElectricBuses.eu o.D.:** JIVE, <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive>, abgerufen am 12.03.2020, ohne Datum.
- Frischknecht 2012:** Frischknecht R. Umweltaspekte von Elektroautos. ESU / BAFU
- Genuit 2008:** Genuit, Klaus. (2008). Vehicle interior noise - A combination of sound, vibration and interactivity. Noise-Con 2008, Dearborn, Michigan.
- Greet 2006:** Greet 2.7 2006 (database): The Transportation Vehicle-Cycle Model. Argonne National Laboratory
- Helms et al., 2010 (conf.):** Electric vehicle and plug-in hybrid energy efficiency and life cycle emissions. Ifeu
- Heutschi 2004:** Heutschi K (2004b) SonRoad-Berechnungsmodell für Strassenlärm. Environmental series no. 366. Swiss Agency for Environment, Forest and Landscape (SAEFL), Bern.
- ICCT 2017:** Financing the transition to soot-free urban bus fleets in 20 megacities, Washington DC, Oktober 2017.
- INFRAS 2018:** Externe Evaluation des Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramms, im Auftrag des Bundesamts für Energie, Oktober 2018.
- Ishihara et al. 1999 / 2002:** Ishihara et al. Environmental Burdens of Large Li-Ion Batteries Developed in a Japanese National Project. Central Research Institute of Electric Power Industry 1999 / 2002

- Li, Castellanos and Maassen 2018:** Emerging trends and innovations for electric bus adoption – a comparative case study of contracting and financing of 22 cities in the Americas, Asia-Pacific, and Europe, *Research in Transportation Economics*, S. 470–481, 2018.
- Litra 2019:** Verkehrszahlen, Ausgabe 2019, Informationsdienst für den öffentlichen Verkehr, Bern, August 2019.
- INEA o.D.a:** Connecting Europe Facility, <https://ec.europa.eu/inea/en/connecting-europe-facility>, abgerufen am 12.03.2020, ohne Datum.
- INEA o.D.b:** TEN-T Projects, <https://ec.europa.eu/inea/en/ten-t/ten-t-projects>, abgerufen am 12.03.2020, ohne Datum.
- INFRAS/PSI/Quantis 2020:** Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext. INFRAS, PSI & Quantis im Auftrag von Stadt und Kanton Zürich. Bern, Villigen, Zürich, Juli 2020.
- IWSB und HSLU 2018:** Evaluation Solidarbürgschaften im regionalen Personenverkehr, IWSB – Institut für Wirtschaftsstudien Basel und Hochschule Luzern – Wirtschaft, Studie im Auftrag des Bundesamts für Verkehr BAV, Schlussbericht, 12.12.2018.
- Majeau-Bettez et al. 2011:** Majeau-Bettez G., Hawkins TR., Strommann AH. Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles. *Environmental Science & Technology* 2011 45(10),4548-4554 DOI: 10.1021/es103607c
- National Research Council 2008:** National Research Council (2008). Minerals, Critical Minerals and the U.S. Economy. The National Academies Press, Washington D.C.
- Notter et al 2010:** Notter D. A., Gauch M., Widmer R., Wager P., Stamp A., Zah R. and Althaus H.J. (2010). "Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles." *Environmental Science & Technology* 44(17): 6550-6556.
- Robinson et al. 2017:** Robinson, G.R., Jr., Hammarstrom, J.M., and Olson, D.W., 2017, Graphite, chap. J of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. J1– J24, <https://doi.org/10.3133/pp1802J>.
- Rydh & Sandén 2005:** Rydh CJ., Sandén B. Energy analysis of batteries in photovoltaic systems Part II. Energy return factors and overall battery efficiencies. *Energy Conversion and Management* 0196-8904 (ISSN) Vol. 46 Issue 11-12 p. 1980-2000
- Samaras and Meisterling, 2008:** Samaras C. and Meisterling K. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy. *Environmental Science & Technology* 2008 42(9),3170-3176 DOI: 10.1021/es702178s
- SEI 2007:** Hybrid Electric and Battery Electric Vehicles, Technology, Costs and Benefits. Sustainable Energy Ireland

- Slack et al 2017:** Slack, J.F., Kimball, B.E., and Shedd, K.B., 2017, Cobalt, chap. F of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States—Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. F1– F40, <https://doi.org/10.3133/pp1802F>.
- Stamp et al. 2013:** Stamp, A., Althaus, H.J. and Wäger, P.A. (2013) Limitations of applying life cycle assessment to complex co-product systems: The case of an integrated precious metals smelter-refinery, Resources, Conservation and Recycling, Available online 8 October 2013, ISSN 0921-3449, <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.09.003>.
- Statista 2020:** www.statista.com; access 25.2.2020
- TA Swiss 2012:** De Haan P., Zah R. mit Beiträgen von Althaus H.J., Bernath K., Bruns F., Fussen D., Gauch M., Wäger P., Widmer R. 2012. Chancen und Risiken der Elektromobilität in der Schweiz. Vdf Hochschulverlag, Zürich
- USGS 2019:** U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, February 2019. Data sheet on Lithium. <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs-2019-lithi.pdf>
- USGS 2020:** U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, February 2019. Data sheet on Rare Earth Elements. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-rare-earths.pdf>
- UVEK 2019:** Reform des regionalen Personenverkehrs (Änderung des Personenbeförderungsgesetzes), Erläuternder Bericht zur Eröffnung des Vernehmlassungsverfahrens, Bern, 17. April 2019.
- Van Gosen et al 2017:** Van Gosen, B.S., Verplanck, P.L., Seal, R.R., II, Long, K.R., and Gambogi, Joseph, 2017, Rare-earth elements, chap. O of Schulz, K.J., DeYoung, J.H., Jr., Seal, R.R., II, and Bradley, D.C., eds., Critical mineral resources of the United States— Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802, p. O1– O31, <https://doi.org/10.3133/pp1802O>.
- WHO 2011:** WHO Burden of Disease from Environmental Noise. Quantification of healthy life years lost in Europe; ISBN 978 92 890 0229 5; WHO: Copenhagen, 2011.
- Wendel 2009:** Wendel M. 2009, Abschätzung des künftigen Angebot-Nachfrage-Verhältnisses von Lithium vor dem Hintergrund des steigenden Verbrauchs in der Elektromobilität. Fraunhofer ISI, Karlsruhe.
- WRI 2019a:** How to enable electric bus adoption in cities worldwide – A guiding report for city transit agencies and bus operating entities, Washington DC, Mai 2019.
- WRI 2019b:** Barriers to adopting electric buses, Washington DC, Mai 2019.
- WRI 2019c:** Financing electric and hybrid-electric buses: 10 questions city decision-makers should ask, Working Paper, Washington DC, Oktober 2019.

Zackrisson et al 2010: Zackrisson M., Avellán L., Orlenius J. Life cycle assessment of lithium-ion batteries for plug-in hybrid electric vehicles – Critical issues. *Journal of Cleaner Production*, Volume 18, Issue 15, 2010, Pages 1519-1529, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.004>.