

Verkehrsbetriebe Zürich VBZ
Zürcher Verkehrsverbund ZVV
Umwelt- und Gesundheitsschutz, Stadt Zürich
Tiefbauamt, Stadt Zürich
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich

Bus-Antriebe im Vergleich: Eine Ökobilanz

Ergänzung zur Studie «Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext»

Bern, Villigen, Zürich , 28. August 2020

Dr. Brian Cox, Dr. Hans-Jörg Althaus, INFRAS
Christian Bauer, Dr. Romain Sacchi, Dr. Chris Mutel, PSI
Dr. Mireille Faist Emmenegger, Barbara Spiegel, Quantis

Impressum

Bus-Antriebe im Vergleich: Eine Ökobilanz

Ergänzung zur Studie «Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext»

Bern, Villigen, Zürich, 28. August 2020

7416a_Bus-Antriebe im Vergleich_Eine Ökobilanz_Schlussbericht

Auftraggebende

Verkehrsbetriebe Zürich VBZ

Zürcher Verkehrsverbund ZVV

Umwelt- und Gesundheitsschutz, Stadt Zürich

Tiefbauamt, Stadt Zürich

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich

Projektleitung

Peter Hofmann, Umwelt- und Gesundheitsschutz, Stadt Zürich

Dr. Brian Cox, Dr. Hans-Jörg Althaus, INFRAS

Autorinnen und Autoren

Dr. Brian Cox, Dr. Hans-Jörg Althaus, INFRAS

Christian Bauer, Dr. Romain Sacchi, Dr. Chris Mutel, PSI

Dr. Mireille Faist Emmenegger, Barbara Spiegel, Quantis

INFRAS, Sennweg 2, 3012 Bern

Tel. +41 31 370 19 19

Steuerungsgruppe

Rainer Zah, Umwelt- und Gesundheitsschutz Stadt Zürich

René Huber, Tiefbauamt Stadt Zürich

Thomas Stoiber, Baudirektion Kanton Zürich

Begleitgruppe

Claudia Kopp, David Sorg, Verkehrsbetriebe Zürich

Marco Rüdüsühli, Zürcher Verkehrsverbund

Peter Hofmann, Umwelt- und Gesundheitsschutz Stadt Zürich

Ruth Furrer, René Huber, Tiefbauamt Stadt Zürich

Thomas Stoiber, Baudirektion Kanton Zürich

Inhalt

Impressum	2
Inhalt	3
Zusammenfassung	4
1. Vorwort	7
2. Vorgehen	8
2.1. Fahrzeugauswahl	8
2.2. Betriebliche Aspekte	9
2.3. Energieketten (Treibstoffversorgung der Fahrzeuge)	10
2.4. Wirkungsabschätzungsmethoden	11
3. Sachbilanz und LCA Ergebnisse von 18m Bussen	15
3.1. Sachbilanz	15
3.2. LCA Ergebnisse	18
3.3. Ergebnisse Zürich Mobilitäts-Umweltindex (ZMU)	40
3.4. Unsicherheiten	44
3.5. Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Busgrößen	46
Glossar	47
Literatur	48
Anhang 1. Annahmen zu 18m Bussen: Allgemein	49
Anhang 2. Annahmen zu 18m Bussen: Massen (kg)	50
Anhang 3. Annahmen zu 18m Bussen: Unsicherheitsangaben	51

Zusammenfassung

In diesem Bericht werden die Ergebnisse einer Ökobilanz von Stadtbussen mit verschiedenen Antriebstechnologien diskutiert. Der Bericht basiert auf der Studie «Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext» und wurde mit den Parametern und der Methodik dieser Studie erstellt. Neben Dieselbussen werden Diesel-Hybridbusse sowie vier verschiedene Elektrobusse (Trolleybus, Depotlader, Zwischenlader und Brennstoffzellenbus) betrachtet. Auf eine Betrachtung von biogenen oder synthetischen Treibstoffen wurde in Absprache mit den Auftraggebern und aufgrund der Resultate der Studie «Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext» verzichtet. Bei den biogenen Kohlenwasserstoffen waren geringe Mengenpotenziale ausschlaggebend, dass sie nicht weiterverfolgt wurden. Der Einsatz von strombasierten Kohlenwasserstoffen in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren wurde nicht betrachtet, weil diese Option energetisch so ineffizient ist, dass der Einsatz solcher Treibstoffe auf Bereiche beschränkt werden muss, in denen es keine Alternativen gibt (z.B. Luftverkehr).

Die Ergebnisse beziehen sich auf einen Referenzkilometer bei Gelenkbussen (18m) bei einer typischen Nutzung, wie sie in der Stadt und dem Kanton Zürich auftritt. Den Berechnungen liegt zunächst die Annahme zugrunde, dass Busse unabhängig von ihren Antriebstypen gleich eingesetzt werden. In der Praxis trifft dies aber nicht in jedem Fall zu. Für Vergleiche von Antriebstechnologien auf spezifischen Linien und in Fahrzeugflotten müssen z.B. die Anforderungen des Fahrplans und die Einschränkungen bzgl. Reichweite und Ladezeiten von Elektrobusen berücksichtigt werden, woraus sich z.B. Änderungen beim Fahrzeugbedarf oder den Laufleistungen ergeben können.

Es zeigt sich, dass elektrisch angetriebene Fahrzeuge, insbesondere Batteriebusse, dank der hohen Gesamtenergieeffizienz und dank dem CO₂-armen Strom deutliche Reduktionen der Treibhausgasemissionen ermöglichen. Mit dem VBZ-Strommix (100% erneuerbare Energien) emittieren Elektrobusse über den gesamten Lebenszyklus im günstigsten Fall (Trolleybusse und Zwischenlader) nur 15% der Treibhausgase eines Dieselbusses. Selbst Depotlader mit grossen Batterien und Brennstoffzellenbusse emittieren in einer Lebenszyklusbetrachtung weniger als 25% der Treibhausgase eines Dieselbusses. Würden die Elektrobusse mit dem Schweizer Durchschnittsstrommix geladen, würden sie über den ganzen Lebenszyklus immer noch weniger als 40% der Treibhausgase eines Dieselbusses emittieren. Brennstoffzellenbusse, die mit Wasserstoff aus Schweizer Durchschnittsstrom betankt werden, weisen 63% der Treibhausgasemissionen des Dieselbusses auf.

Auch die Primärenergieverbräuche von Trolley- und Batteriebussen, die mit dem VBZ-Strommix betrieben werden, sind tiefer als die von Dieselbussen. Würden die Elektrobusse mit Schweizer Durchschnittsstrom betrieben, wäre der gesamte Primärenergiebedarf etwa gleich

hoch wie für Dieselbusse, wobei ein beträchtlicher Teil der Energie zum Betrieb der Elektrobusse mit beiden Strommixen aus erneuerbaren Quellen stammt, während die Energiequelle für Dieselbusse fast ausschliesslich nichterneuerbar ist.

Wegen ihrer vergleichsweise geringeren Energieeffizienz haben Brennstoffzellenbusse im besseren Fall (mit VBZ Strom-Mix) einen ähnlichen Primärenergiebedarf wie Dieselbusse. Mit dem Schweizer Durchschnittstrommix liegt ihr gesamter und nichterneuerbarer Primärenergiebedarf höher als beim Dieselbus.

Elektrobusse schneiden auch bezüglich Stickoxidemissionen (NO_x) besser ab als Dieselbusse. Dies ist nicht nur während der Nutzungsphase, die vor allem im städtischen Kontext von hoher Bedeutung ist, der Fall, sondern auch für die Emissionen über den gesamten Lebenszyklus.

Bei Feinstaubemissionen (PM_{10}) ergeben sich in Bezug auf die Gesamtmenge kaum Unterschiede zwischen den Antriebsarten. Während Elektrobusse in Bezug auf die direkten Emissionen im Betrieb besser abschneiden als Dieselbusse, verlagern sich die Feinstaubemissionen jedoch in die Vorketten an die jeweiligen Produktionsorte (etwa bei der Batterieproduktion). Welche Wirkungen Feinstaubemissionen entfalten, hängt dabei stark vom Ort der Emissionen ab. So wirken die Betriebsemissionen der Dieselbusse z.B. direkt im dichten urbanen Raum, während z.B. die gleichen Emissionen aus der Vorkette der Batterieproduktion unter Umständen weit weniger Menschen betreffen können und dadurch die Gesundheitsschäden insgesamt zurückgehen können.

Elektrobusse, insbesondere Depotlader mit grossen Batterien, benötigen in der Produktion mehr Rohstoffe als Busse mit anderen Antriebssystemen (z.B. Lithium, Nickel, Kobalt). Das Potenzial für ein industrielles Recycling am Lebensende kann mangels Erfahrungen und passender Methodik noch nicht abschliessend beurteilt werden.

Einen grossen Teil des ausgewiesenen Wasserbedarfs bei Elektrobussen fällt bei der Stromherstellung aus Wasserkraft an (Verdunstung aus Stauseen). Die Herstellung von Batterien für Depotlader weist ebenfalls einen hohen Wasserverbrauch auf. Diese stammt nicht wie häufig erwartet von Lithium-Gewinnungsprozessen, sondern aus der Herstellung verschiedene Zwischenprodukte.

Die «Gesamtumweltbilanz» hängt stark davon ab, wie die einzelnen Indikatoren gewichtet werden. Diese Studie betrachtet zwei etablierte Methoden (UBP 2013 und ReCiPe). Zudem wurde im Rahmen der Studie «Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext» der «Zürich Mobilitäts-Umweltindex» entwickelt, welcher sämtliche Umweltauswirkungen mit einer Zürich-spezifischen Gewichtung zusammenfasst. Alle drei Methoden ergeben bei einer Betrachtung des Gesamt-Lebenszyklus generell vorteilhafte Ergebnisse für Trolley- und Batteriebusse und teilweise auch für Brennstoffzellenfahrzeuge (vor allem beim VBZ-Strommix).

Busse, die mit dem VBZ-Strommix betrieben werden, schneiden für alle relevanten Wirkungsabschätzungsmethoden besser ab als Busse, die mit dem Schweizer Durchschnittstrommix betrieben werden.

Die hohe Lebensfahrleistung, die von Bussen im öffentlichen Verkehr zurückgelegt wird, führt dazu, dass die Produktionsbelastung von Elektrobussen pro Fahrzeugkilometer tiefer liegt als die von Personenwagen. Damit dominieren die ökologischen Vorteile dieser Busse im Betrieb die Ergebnisse viel stärker als bei anderen Fahrzeugtypen wie beispielsweise bei Personenwagen. Die Annahmen zur Lebensfahrleistung der Fahrzeuge sowie die Lebensdauer und die Größe der Batterie sind sehr entscheidend für die Resultate und werden in einer Sensitivitätsanalyse betrachtet.

1. Vorwort

Heute gibt es in der wissenschaftlichen Literatur sowie in Ökobilanzstudien unterschiedlichste Aussagen zur ökologischen Qualität von Elektromobilität und alternativen Antrieben. Die Arbeiten sind von sehr unterschiedlicher Qualität, doch selbst bei seriös gemachten Studien können die Ergebnisse stark variieren. Gründe dafür liegen meist in den unterschiedlichen Festlegungen bezüglich Rahmen (Scope) und Systemgrenzen und zum Teil an Datenquellen, die mittlerweile überholt sind.

Der motorisierte Strassenverkehr muss in absehbarer Zukunft zur Erreichung der Pariser Klimaschutzziele komplett von fossilen Treibstoffen wegkommen. Alternative Antriebssysteme und / oder eine Reduktion der Fahrleistungen (z.B. durch eine Verlagerung von Verkehren auf ÖV oder Velo) sind die einzigen Möglichkeiten, dieses Ziel zu erreichen. Weil weder nachhaltige Bio- noch synthetische Treibstoffe in ausreichenden Mengen verfügbar sein werden, um den heutigen und prognostizierten Verkehr zu betreiben, sind Elektrofahrzeuge momentan die einzige bekannte Technologie, um eine Dekarbonisierung des motorisierten Strassenverkehrs zu erreichen. Entsprechend führen heute schon die meisten konventionellen Automobilhersteller elektrische Modelle und relevante Exponenten der Industrie (z.B. Renault, VW) forcieren die Entwicklung von elektrischen Fahrzeugen stark. Das gilt nicht nur für Personenwagen, sondern auch für Linienbusse. Auch die Politik beschäftigt sich mit unterschiedlichen Aspekten des Themas. Es gilt politische Vorstösse mit Bezug auf Fahrzeugantriebe zu beantworten. Im Weiteren benötigen der Kanton und die Stadt Zürich eine aktuelle Grundlage für die Erarbeitung von Strategien und Konzepten zur Elektromobilität unter Zürich-spezifischen Gegebenheiten.

Aus diesen Gründen hat der Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich zusammen mit dem Tiefbauamt der Stadt Zürich und dem kantonalen Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft INF-RAS, PSI und Quantis beauftragt, die für politische Entscheidungen benötigten Grundlagen zu den ökologischen Auswirkungen und Kosten von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben aufzuarbeiten und die Studie «Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext» zu erstellen.

Ergänzend zur Studie «Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext» fokussiert dieser Bericht auf die Ökobilanzergebnisse von Stadtbussen für den Linienverkehr. Es wurden in dieser Studie keine neuen Berechnungen gemacht. Die Methodik, Parameter und Ergebnisse wurden alle aus der Studie «Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext» übernommen.

2. Vorgehen

Dieser Bericht beinhaltet nur die Ergebnisse für 18m lange Stadtbusse. Weitere Infos zu Methodik, Annahmen und Ergebnisse sind in der Studie «Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext» (INFRAS, PSI & Quantis 2020) zu finden.

Der Referenzfluss der Studie ist Fahrzeugkilometer (Fzkm, km). Die Studie liefert Angaben zu den Umweltauswirkungen eines Fahrzeugs pro Kilometer bei einer typischen Nutzung in der Stadt und im Kanton Zürich. Bei einer spezifischen Nutzung (spezifische Linie, Flotte) können aber signifikant andere Ergebnisse resultieren. Mehr dazu in Kap. 2.2.

2.1. Fahrzeugauswahl

In diesem Bericht wird der Fokus auf 18m Busse gelegt. Im Kapitel 3.5 wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gefässgrössen diskutiert. Die Fahrzeuge und Antriebstypen, die analysiert werden, sind in Tabelle 1 aufgelistet. Dies sind die heute und auch künftig relevanten Varianten.

Tabelle 1 Fahrzeugauswahl

Fahrzeugtyp	Grösse	Antriebsart	Variante	Lebensfahrleistung (km) ¹	Lebensdauer (Jahre)
Bus	18m Trolley	Elektrisch	Batterietrolley	1105000	17
	18m	Diesel		910000	14
		Diesel-Hybrid		910000	14
		Elektrisch	Depotlader	910000	14
		Elektrisch	Zwischenlader ²	910000	14
		Brennstoffzelle		910000	14

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Diesel- und Brennstoffzellenbusse könnten auch als Plug-In-Hybride ausgestaltet werden. Im Vergleich zu einem Diesel-Hybrid oder einem konventionellen Brennstoffzellenbus hat ein Plug-in-Hybrid eine grössere Batterie, die zusätzlich am Stromnetz geladen werden kann. Plug-in-Hybride vereinen die Vor- und Nachteile der beiden kombinierten Technologien. Der wichtigste Vorteil von Plug-in-Hybriden ist, dass die Batteriekapazität nur auf den «Normalbetrieb» ausgerichtet sein muss und bei einer aussergewöhnlichen Anforderung der Verbrennungsmotor oder die Brennstoffzelle die benötigte Energie bereitstellen kann. Dieser Vorteil kommt also bei Fahrzeugen zum Tragen, die oft mit relativ geringem Energiebedarf pro Tag auskommen, an

¹ Zu erwähnen ist, dass den Fahrzeugkategorien die heute durch den ZVV vorgegebenen Abschreibungsdauern zugrunde gelegt wurden, die sich auch auf die Lebensfahrleistung auswirken.

² wird oft auch als «Gelegenheitslader» bezeichnet.

manchen Tagen aber einen viel höheren Energiebedarf haben. Typisches Beispiel ist ein Personenwagen, der unter der Woche für den täglichen Arbeitsweg von 30 km eingesetzt wird, am Wochenende aber für eine Freizeitfahrt von über 100 km. Da in der vorliegenden Studie auf standardisierte Vergleichswerte fokussiert wird (Referenzfluss Fahrzeugkilometer) und nicht näher auf betriebliche Gegebenheiten oder Gesamtflottenbetrachtungen eingegangen wird, wurden Plug-In-Hybride hier nicht betrachtet.

Dieselbusse und Hybride können mit fossilem Diesel, mit so genanntem Biodiesel (aus unterschiedlichen Rohstoffen) oder mit synthetischem Diesel (PtL) betrieben werden. PtL wird aus Wasserstoff und CO₂ hergestellt. Der Wasserstoff stammt dabei aus Elektrolyse, die mit unterschiedlichem Strom betrieben werden kann, das CO₂ wird aus der Luft gewonnen³. Der wesentlichste Unterschied zum fossil betriebenen Dieselbus ist in beiden Fällen, dass die CO₂-Betriebsemissionen als Null gerechnet würden. Dafür sind die entsprechenden Emissionen aus der Energieherstellung deutlich höher als diejenige der Dieselproduktion. Insgesamt ergäben sich so trotzdem reduzierte Treibhausgasemissionen gegenüber einem Dieselbus. Dennoch betrachten wir keine dieser Optionen als realistischen Weg, um langfristig Busse für den ÖV in relevanten Mengen zu betreiben. Erstens hat dies mit der geringe Gesamteffizienz und beschränkte Verfügbarkeit damit zu tun. Zweitens dass andere Verkehrsträger (insbesondere die See- und Luftfahrt) mangels Alternativen zu flüssigen Kohlenwasserstoffen als Treibstoffe eine höhere Zahlungsbereitschaft haben werden, wenn sie CO₂ Emissionen reduzieren müssen.

2.2. Betriebliche Aspekte

Die Studie liefert Angaben zu den Umweltauswirkungen eines Fahrzeugs pro Kilometer bei einer typischen Nutzung, wie sie auch in der Stadt und dem Kanton Zürich auftritt. Den Berechnungen liegt zunächst die Annahme zugrunde, dass Busse unabhängig von ihren Antriebstypen gleich eingesetzt werden können. Dies ist jedoch in der Praxis nicht immer der Fall: Für Vergleiche von spezifischen Nutzungen müssen die Anforderungen des Fahrplans und die Einschränkungen bezüglich Reichweite und Ladezeiten von Elektrobussen berücksichtigt werden.

So kann es sein, dass auf einer bestimmten Linie beim Einsatz von Zwischenladern ein zusätzlicher Kurs in den Fahrplan eingefügt werden müsste, damit genügend Zeit zum Laden an der Endhaltestelle bleibt. Das bedeutet dann, dass man z. B. anstelle von 7 Dieselbussen 8 Elektrobuse benötigen würde (im Gegenzug mit einer deutlich geringeren Tageslaufleistung und somit einer potenziell längeren Fahrzeuglebensdauer), was Auswirkungen auf die Kosten und Ökobilanz-Ergebnisse hätte. Bei Depotladern kann es vor allem auf Linien mit sehr langen

³ Es ist auch denkbar, dass Wasserstoff und CO₂ aus fossilen Quellen stammen. So würde ein PtL aber weder ökonomisch noch aus Umweltsicht Sinn ergeben. Darum werden solche Pfade nicht weiter betrachtet.

Tagesdistanzen vorkommen, dass im Vergleich zu Diesel- oder Brennstoffzellenbussen mehrere zusätzliche Fahrzeuge benötigt würden. Auch das hat Auswirkungen auf die Kosten und Ökobilanz-Ergebnisse der Depotlader⁴.

Um solche Fälle zu rechnen, ist als Teil des Projekts «Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext» (INFRAS, PSI & Quantis 2020) ein Excel-Tool entwickelt worden. Mit diesem Excel-Tool können die wichtigsten Annahmen angepasst und die Ergebnisse neu gerechnet werden. Das Tool ist für alle Mitarbeitenden der Auftraggeberschaft zugänglich, darf aber nicht an Dritte ausserhalb dieser Organisationen weitergegeben werden.

2.3. Energieketten (Treibstoffversorgung der Fahrzeuge)

Die berücksichtigten Energieketten sind in Tabelle 2 aufgelistet. Tabelle 3 gibt weitere Infos zu den Strommischen. Zusätzliche Informationen und Quellen zu den Energieketten können der Studie «Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext» entnommen werden.

Tabelle 2: Energieketten zur Treibstoffversorgung der Fahrzeuge

Energie	Herkunft	Bemerkung
Diesel	Fossil	Herstellung mit heutiger Technologie
Strom	Mix CH	2020
	Mix CH WWB ⁵	Herstellung mit heutiger Technologie, TechnologiemiXe von 2030, 2040, 2050
	Mix VBZ	2020. Keine Anpassung für die Zukunft
Wasserstoff	Mix CH	2020
	Mix CH WWB	Herstellung mit heutiger Technologie, TechnologiemiXe von 2030, 2040, 2050
	Mix VBZ	2020. Keine Anpassung für die Zukunft

Tabelle INFRAS, PSI, Quantis.

⁴ Die genauen Einflüsse auf Kosten und ökologischen Auswirkungen sind stark von Annahmen wie Laufleistung und Fahrzeuglebensdauer abhängig und müssten mit detaillierten Berechnungen angeschaut werden. Siehe INFRAS (2019, 2020) für Beispiele.

⁵ Weiter-wie-Bisher

Tabelle 3: Technologiemixe zur Strombereitstellung für den Betrieb der Fahrzeuge

	Mix VBZ	Mix CH 2020	Mix WWB 2030	Mix WWB 2040	Mix WWB 2050
Wasser	100.0%	55.6%	37.1%	46.0%	42.6%
Nuklear		18.6%	22.8%	3.4%	2.5%
Fotovoltaik		1.6%	11.8%	20.2%	21.7%
Wind		0.8%	9.4%	11.0%	16.2%
Holz/ Biomasse/ Biogas/ Abfall		3.1%	5.0%	4.7%	4.2%
Gas		0.5%	9.4%	14.3%	12.5%
Kohle/ Heizöl / Gichtgas		0.0%	4.3%	0.4%	0.3%
Import Europa (Generisch)		19.9%			
Treibhausgase (g CO _{2eq} / kWh)	11.2	105.9	118.0	93.4	87.2

Der «Mix CH 2020» stammt aus ecoinvent, die anderen Mixe wurden spezifisch von der Stadt und dem Kanton Zürich vorgegeben. Der ecoinvent Mix enthält im Gegensatz zu den anderen unter «Wasser» rund 15% Wasserkraft aus Frankreich.

Tabelle INFRAS.

2.4. Wirkungsabschätzungsmethoden

Tabelle 4 listet die Wirkungsabschätzungsmethoden auf, die nachstehend zur Beurteilung der Ökobilanz der Busse verwendet wurden.

Tabelle 4 Wirkungsabschätzungsmethoden

Aspekt	Methode	Einheit
Treibhausgase	IPCC 2013	kg CO ₂ eq
Primärenergieverbrauch gesamt	Kumulierter Energieaufwand erneuerbar und nicht erneuerbar	MJ
Primärenergieverbrauch erneuerbar	Kumulierter Energieaufwand erneuerbar	MJ
Primärenergieverbrauch nicht erneuerbar	Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar	MJ
PM ₁₀	Sachbilanzergebnis kumuliert	kg
NO _x	Sachbilanzergebnis, kumuliert	kg
Rohstoffverbrauch	ILCD 2.0 2018 midpoint	kg Sb eq
Wasserverbrauch	AWARE	m ³
Ökologische Knappheit (UBP)	Methode der ökologischen Knappheit (2013)	Punkte
ReCiPe	ReCiPe single score	Punkte
Zürich-Mobilitäts-Umweltindex (ZMU)	Projektspezifische Entwicklung	Punkte

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Die Treibhausgasemissionen werden verwendet als Mass für den Beitrag zum Klimawandel, gemessen in “kg CO₂-Äquivalent” (kg CO₂ eq). Es werden die neuesten Treibhausfaktoren des IPCC für einen Zeithorizont von 100 Jahren verwendet (Stocker, Qin et al. 2013), wie in ecoinvent v3.6 implementiert.

Der **kumulierte Primärenergieverbrauch**, gemessen in Megajoule (MJ), repräsentiert den Verbrauch an Primärenergieträgern unterteilt in erneuerbar / nicht erneuerbar (fossil, nuklear). Die verwendeten Primärenergiefaktoren entsprechen der aktuellen Implementierung in ecoinvent v3.6.

Feinstaub (PM₁₀) beinhaltet primäre Partikel unter 10 µm, die über den ganzen Lebenszyklus direkt emittiert werden (keine sekundäre Partikel). Die Partikel können eingeatmet werden und stellen eine Belastung für die menschliche Gesundheit dar. Diese Feinstaubemissionen werden in "kg PM₁₀" gemessen.

Stickoxide (NO_x) beinhaltet NO₂- und NO-Emissionen, die über den ganzen Lebenszyklus direkt emittiert werden. Stickstoffdioxid hat eine gesundheitsschädigende Wirkung. Zudem sind Stickoxide Vorläufersubstanzen von Feinstaub und Ozon, die für die menschliche Gesundheit eine Belastung darstellen. Weiter sind Stickoxide auch für die Versauerung von Böden und Gewässern mitverantwortlich. Stickoxide werden in "kg NO_x" gemessen.

Rohstoffverbrauch quantifiziert den Abbau von abiotischen Ressourcen nach der ILCD 2.0 Methode (Fazio et al. 2018). Rohstoffverbrauch wird in Antimon-Äquivalenten (kg Sb eq) gerechnet. Antimon (Sb) dient als Referenzsubstanz für metallische und mineralische Ressourcen. Alle verbrauchten Metalle und Minerale werden über einen spezifischen Faktor, der die jeweilige «Knappheit» repräsentieren soll, in das Metall Antimon umgerechnet.

Allgemein sind die Ergebnisse zu Rohstoffverbrauch mit Vorsicht zu interpretieren, da die Cut-off Modellierung von ecoinvent und die gewählte Impact Assessment Methode nicht zusammenpassen. Die Sachbilanz mit Cut-off von Materialien, die einem Recycling zugeführt werden, weist einen zu hohen Wert aus für den Verbrauch von Rohstoffen, die im Recycling zurückgewonnen werden. Das kommt daher, dass das Modell vernachlässigt, dass die Materialien, die aus der Natur genommen werden, nicht unbedingt verloren gehen, sondern nach der Nutzung zu fast 100% wieder zurückgewonnen werden können. Das ist insbesondere relevant für Metalle. Die Methode zur Wirkungsabschätzung berücksichtigt aber diese anthropogenen Lager nicht, sondern geht davon aus, dass ein Rohstoff verloren ist, wenn er der Natur entnommen wurde. Damit werden die Fahrzeuge, die einen höheren Bedarf an gut wiederverwertbaren Materialien aufweisen, systematisch benachteiligt. In unserem Fall sind das die Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge. Für weitere Ausführungen siehe z.B. Althaus & Gauch (2010) oder Guinee (2016).

Wasserverbrauch wird anhand des Indikators AWARE (Available water remaining) in m³ gerechnet nach der ILCD 2.0 Methode (Fazio et al. 2018), implementiert in ecoinvent v3.6. Die Methodik berücksichtigt regionale Wasserknappheit annäherungsweise, indem Charakterisierungsfaktoren für einzelne Länder benutzt werden. Das bedeutet, dass pro Region ein separater Wasserknappheitsfaktor hinterlegt ist. Für die Schweiz beträgt der Faktor etwa 1/43 des globalen Durchschnitts. Der Indikator enthält nicht nur den Wasserverbrauch in Prozessen, sondern auch Wasserverluste durch Verdunstung.

Die Methode der **ökologischen Knappheit** (UBP) (Frisknecht und Knöpfel, 2013) berücksichtigt ein breites Spektrum von Umweltbelastungen und fasst diese durch Vollaggregation in

einer Kennzahl zusammen. Das Ergebnis sind Umweltbelastungspunkte (UBP). Im Gegensatz zu anderen Methoden basieren die UBP nicht auf potenziellen Schäden, sondern auf gesetzlichen Grenzwerten für Schadstoffe und anderen potenziell schädlichen Stoffflüssen sowie auf den jährlichen Emissionen der Schweiz als Bezugswerte. Somit werden Emissionen ausserhalb der Schweiz ebenfalls gemäss der Gesetzgebung und der Umweltprobleme in der Schweiz bewertet. Weiter auffallend ist, dass Treibhausgasemissionen ein sehr geringes Gewicht zugemessen wird. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass dieses geringe Gewicht nicht mehr die aktuellen Vorgaben der Schweizer Klimapolitik (Netto-Null im Jahr 2050) widerspiegelt. Dieses Ziel bedingt mindestens eine Halbierung des Zielwertes für THG-Emissionen gegenüber dem Wert, der in der UBP-Methodik angewendet wird. Das würde den UBP Faktor für THG-Emissionen von 0.46 UBP/g CO_{2-eq} auf über 2 UBP/g CO_{2-eq} erhöhen. Somit sollte das Gewicht von THG-Emissionen um den Faktor 4 höher liegen als in UBP 2013.

Die **ReCiPe Total** Methode berechnet die Schäden, welche an den drei Schutzziele Menschliche Gesundheit, Ökosystemqualität und Ressourcen entstehen. Anschliessend werden diese verschiedenen Schäden auf der Basis von gesellschaftlichen Wertmassstäben relativ zueinander gewichtet und summiert, um eine Punktezahl zu bekommen. Je grösser die Punktezahl, desto grösser sind die Umweltauswirkungen (Goedkoop et al. 2013). Es wurden die ReCiPe 2008 implementiert, da die Umsetzung von ReCiPe 2016 in Brightway2 (LCA Software) einige Inkonsistenzen gezeigt hat, die zuerst geklärt werden müssen, bevor die Ergebnisse verwendet werden können.

Neben der LCA-Studie wurde in der Studie "Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext" auch eine neue Methode zur Wirkungsabschätzung entwickelt. Der „**Zürich Mobilitäts-Umweltindex (ZMU)**“ aggregiert die verschiedenen relevanten Umweltaspekte dieser Studie zu einem Index. Dabei werden die Resultate aus der LCA mit den weiteren relevanten Aspekten wie Lärm und Raumbedarf, die typischerweise in einer LCA nicht bewertet werden, in einem Index aggregiert, und entsprechend ihrer Relevanz im urbanen Umfeld gewichtet.

Das Zusammenführen von verschiedenen Umweltaspekten zu einem Index beinhaltet subjektive Elemente. Deshalb war es wichtig, die ZMU-Faktoren in möglichst enger Zusammenarbeit mit dem Kanton und der Stadt Zürich zu entwickeln. Dies geschah, indem die Begleitgruppe der Studie "Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext" die Kernelemente der Faktoren im Rahmen eines Workshops erarbeitet hat. Es wurden zwei Gewichtungssets erarbeitet: «global» und «lokal». Im «globalen» Gewichtungssset wurden die globalen Aspekte wie beispielsweise Klimaveränderung stärker gewichtet, im «lokalen» vor allem Lärm und Raumbedarf. Tabelle 5 zeigt die Gewichtungsfaktoren für den ZMU. Weitere Informationen sind in der Studie «Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext» zu finden.

Tabelle 5: Gewichtungsfaktoren für den ZMU-Index

Schutzgut	Indikatoren	Gewichtungsset GLOBAL		Gewichtungsset LOKAL	
		Anteil am Total	Anteil des Schutzgutes	Anteil am Total	Anteil des Schutzgutes
Mensch	Luftschadstoffe (PM ₁₀ , NO _x)	10%	30%	26%	50%
	Lärm	3%		15%	
	ReCiPe Menschliche Gesundheit (ohne Treibhausgase)	17%		9%	
Natur / Ökosysteme	Treibhausgase (CO ₂ -Äquivalente)	22%	40%	9%	30%
	ReCiPe Natur/Ökosysteme (ohne Treibhausgase)	18%		21%	
Ressourcen	Rohstoffverbrauch	8%	30%	1%	20%
	Energieverbrauch, nicht-erneuerbar	8%		4%	
	Energieverbrauch, erneuerbar	5%		4%	
	Wasserverbrauch	8%		1%	
	Raumbedarf	2%		10%	
Total		100%	100%	100%	100%

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

3. Sachbilanz und LCA Ergebnisse von 18m-Bussen

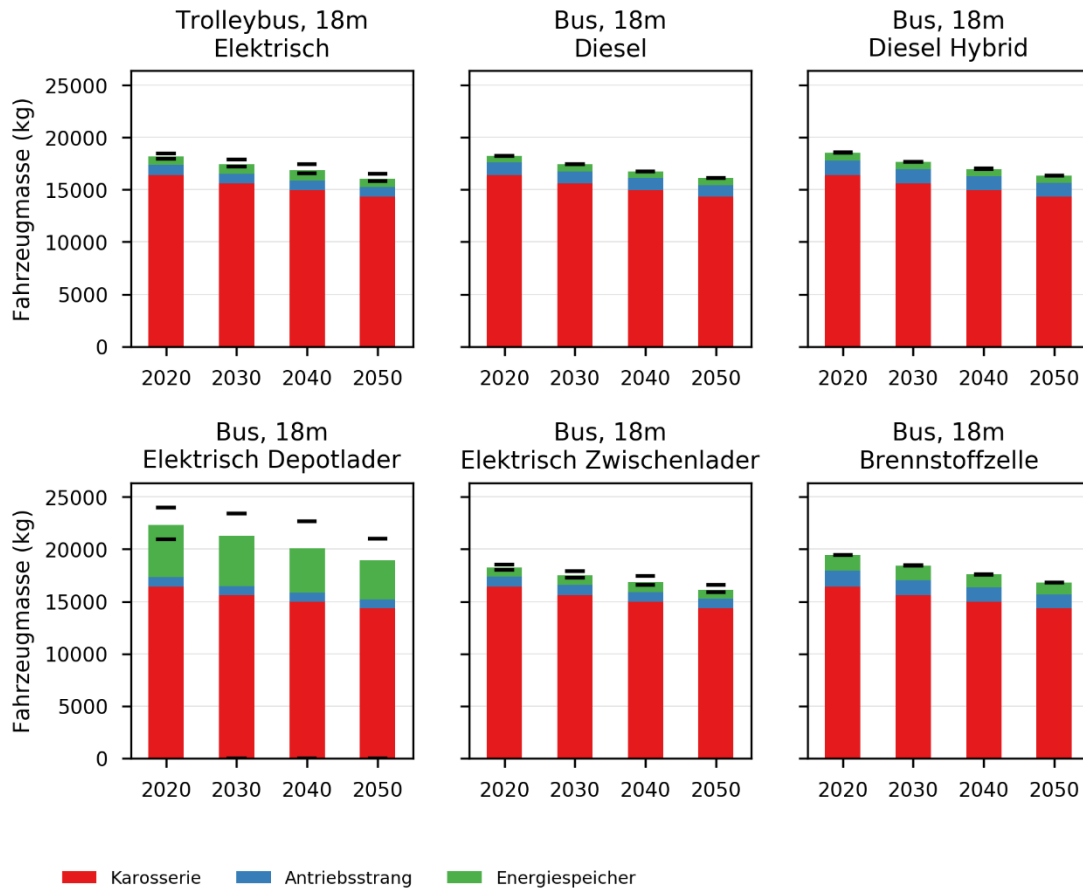
Im Folgenden werden zuerst die wichtigsten Punkte zu den Sachbilanzen (Inventare der Stoff- und Energieflüsse) erklärt. Details dazu finden sich auch im Anhang zu diesem Bericht. Danach folgen die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung.

3.1. Sachbilanz

3.1.1. Bus-Masse

Abbildung 1 zeigt die Fahrzeugmasse für die 18m-Busse. Wie sich diese Massen für 2020 und 2050 zusammensetzen, ist in Anhang 2 zu finden. Die Fahrzeugmasse nimmt mit der Zeit tendenziell ab wegen technischen Fortschritten (z.B. optimierte Antriebssysteme) und Leichtbau. Depotlader sind deutlich schwerer als andere Busse mit vergleichbarer Grösse wegen ihrer grossen Batterie. In dieser Studie nehmen wir an, dass die Energiespeicherkapazität von Depotladern in Zukunft wachsen wird. Das heisst, dass Batterien für Depotlader in 2050 nur etwa 20% leichter sein werden als heute. Sie werden aber über 80% mehr Energiespeicherkapazität und dementsprechend eine höhere Reichweite haben. Siehe Anhänge 1 und 2 für weitere Informationen zu den Massen und zur Energiespeicherkapazität.

Abbildung 1 Bus Masse



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

3.1.2. Energieverbrauch Nutzungsphase

Abbildung 2 zeigt den Betriebsenergieverbrauch (Endenergie-, oder Treibstoffverbrauch) von 18m-Bussen. In Anlehnung an HBEFA 4.1 wird je nach Fahrzeug eine Effizienzverbesserung zwischen 0.5% und 1% pro Jahr angenommen, die auf Verbesserungen bzgl. Aerodynamik, Rollwiderstand und Antriebsoptimierung zurückzuführen ist. Bei Dieselmotoren wird separat berücksichtigt, dass sie mehr Effizienzsteigerungspotenzial haben als andere Antriebssysteme (z.B. Mild-hybrid-Systeme). Darum wird ihnen für die nächsten zehn Jahren eine etwas höhere jährliche Verbesserungen zugerechnet.

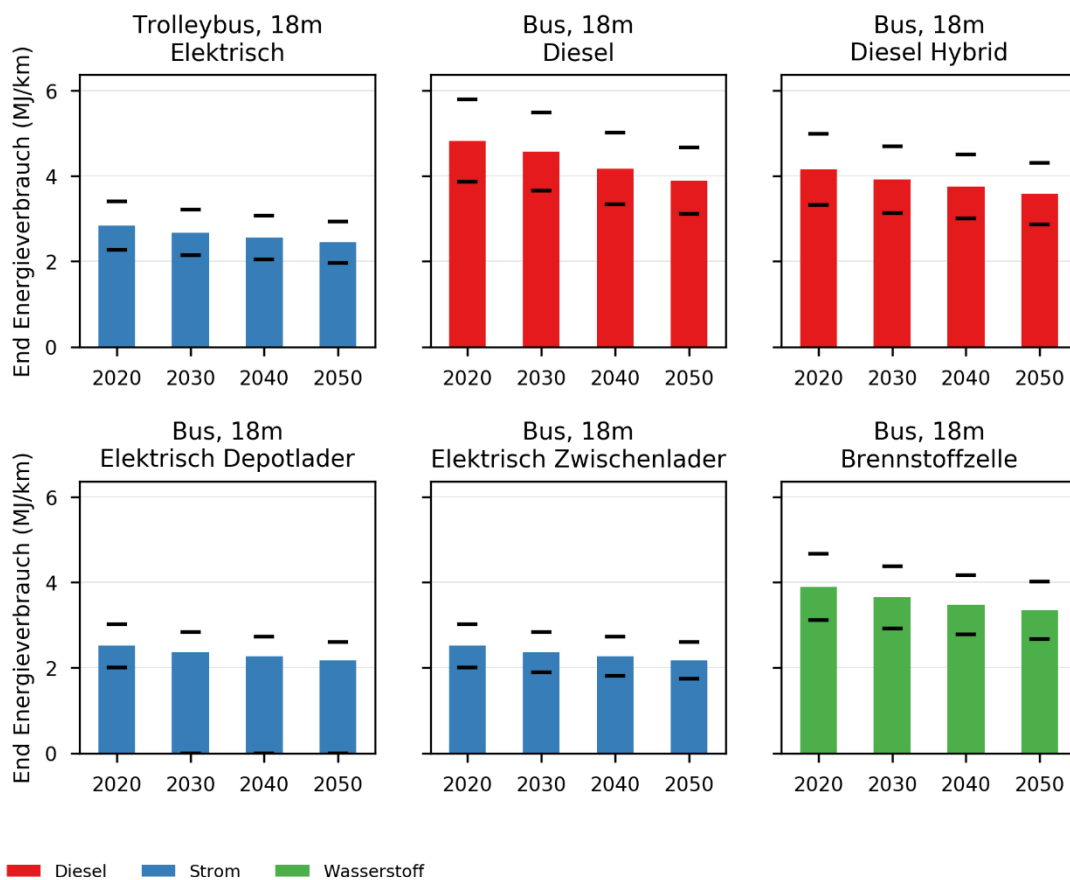
2020 beträgt der Energiebedarfsvorteil von Hybridbussen im Schnitt etwa 15% gegenüber Dieselmotoren. Dies ist nicht nur eine Annahme, da in HBEFA Hybridbusse nicht lediglich eine Ableitung Dieselmotoren sind. Stattdessen wurden Messwerte für beide Bustypen in Treibstoffverbrauchskurven nach Geschwindigkeit und Last aggregiert. Diese Kurven wurden dann einge-

setzt, um den Energieverbrauch der verschiedenen Fahrsituationen auszurechnen. Diese wurden weiter aggregiert zu Schweizer Durchschnittswerten. Je nach Fahrsituation kann die Effizienzsteigerung durch Hybridisierung unterschiedlich sein, der Durchschnitt beträgt aber 15%.

Bei allen Bussen beinhaltet der Energieverbrauch auch die Energie für Hilfsaggregate sowie für Heizung und Kühlung. Bei Elektrobussen wird von elektrischer Beheizung ausgegangen. Es werden 15% Ladeverluste für Elektrobusse angenommen, die hier in der Nutzungsphase schon eingerechnet sind.

Die Unsicherheit des Energieverbrauchs bei 18m-Bussen wird im Bereich von +/- 20% des Basiswertes geschätzt. Dieser Bereich umfasst Unterschiede zwischen spezifischen Fahrzeugen und auch verschiedene Betriebsituationen wie Topographie, Geschwindigkeitsmuster, Fahrstil usw. Auch die Beheizung und Klimatisierung der Fahrzeuge, die ähnlich viel Energie brauchen kann wie der Fahrbetrieb, unterliegt grossen Schwankungen aufgrund der Variabilität der Aussentemperatur.

Abbildung 2 Energieverbrauch Nutzungsphase



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

3.1.3. Unsicherheiten

Das Modell bildet realistische Schwankungsbereiche für die wichtigsten Annahmen ab:

- Lebensfahrleistung
- Brennstoffzellenersatz
- Batterieenergiedichte
- Batterieersatz
- Energieverbrauch

Annahmen für diese Parameter sind für drei Fälle vorhanden: Basis, BestCase, und WorstCase (Siehe Anhang 3). Die Variante Basis bildet den Standardwert und soll benutzt werden, wenn keine besseren Informationen vorhanden sind. BestCase und WorstCase bilden realistisch geschätzte beste bzw. schlechteste Fälle für jeden Parameter. Allerdings geben BestCase und WorstCase keine Informationen zu Wahrscheinlichkeiten oder Verteilungen der Ergebnisse. Für mehr Informationen dazu verweisen wir auf Cox et al. (2018) und Cox et al. (2020), da solche Analysen den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden.

3.2. LCA Ergebnisse

Alle Grafiken in diesem Kapitel enthalten Ergebnisse, die für 18m-Busse in typischen Betriebsfällen berechnet worden sind. Beim Strommix für die Batterieladung werden Ergebnisse mit dem VBZ-Strommix dem Schweizer Durchschnittstrom (CH-Strommix) gegenübergestellt, wo dies interessant ist. Für die Herstellung von Wasserstoff (Elektrolyse) wird jeweils der gleiche Strommix zugrunde gelegt wie für das Laden der Batterien. Dieselsebusse werden mit rein fossilem Brennstoff betankt⁶.

Die Höhe der farbigen Säulen in den Grafiken entspricht einer Berechnung mit den als realistisch eingeschätzten Werten (Basis). Die schwarzen horizontalen Striche zu den Säulen repräsentieren den Schwankungsbereich der Resultate und geben somit einen Hinweis auf die Unsicherheiten. Der tieferliegende Strich zeigt den minimalen Wert, d.h. wenn bei den Unsicherheiten alle günstigsten Werte kumuliert würden (BestCase), der höherliegende Strich gibt Auskunft über einen maximalen Wert, wenn alle negativen Extremwerte kumuliert würden (WorstCase).

Erklärung der Begriffe:

- **Fahrbahn** beinhaltet die Herstellung und Wartung der Strasse.

⁶ 2019 wurde in der Schweiz dem Diesel im Durchschnitt 5.2% Biodiesel zugemischt.

- **Antriebsstrang** beinhaltet alle antriebsspezifischen Komponenten wie Motoren, Brennstoffzellen, Getriebe usw.
- **Wartung** beinhaltet wartungsbedingte Umweltwirkungen wie jene, die durch Ersatz von Reifen, Bremsen, Ölwechsel, Bleibatteriewechsel usw. entstehen. Der Ersatz von Li-Batterien wird hingegen unter Energiespeicher verbucht.
- **Betriebsemissionen** sind die direkten Emissionen der Fahrzeuge, die aus der Verbrennung des Treibstoffs und durch Abrieb von Bremsen, Pneu und Strasse stammen.
- **Karosserie** beinhaltet alle nicht-antriebsspezifischen Fahrzeugteile wie Karosserie, Reifen, die Bestuhlung usw.
- **Energiespeicher** beinhaltet die antriebsspezifischen Energiespeicher, also Batterie, Wasserstofftank oder Treibstofftank.
- **Energieherstellung** bezeichnet die Herstellung der Endenergie, die im Fahrzeugbetrieb gebraucht wird. Sie umfasst z. B. Rohstoffabbau, Transport, Raffinierung, Stromproduktion und -transport.

3.2.1. Treibhausgase

Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen die Treibhausgasemissionen von Bussen mit dem VBZ- und dem CH-Strommix. Die Herstellung von Batteriefahrzeugen (besonders Depotlader) emittiert etwas mehr Treibhausgase als die von vergleichbaren Verbrennungsfahrzeugen. Dafür haben Batteriefahrzeuge deutlich weniger Emissionen in der Betriebsphase (auch mit der Berücksichtigung der Strom- bzw. Wasserstoff-Herstellung). Aufgrund der hohen Laufleistung lohnt sich Elektromobilität beim Bus ganz besonders, da die zusätzlichen Emissionen der Fahrzeugherstellung über sehr viele Kilometer verteilt werden. Die relativ grossen Unsicherheitsbalken ergeben sich vor allem aus dem Schwankungsbereich der Lebensfahrleistung (Siehe Kapitel 3.4 für eine Unsicherheitsanalyse).

Ein Dieselbus emittiert heute über den gesamten Lebenszyklus rund 4-7-mal so viele Treibhausgase wie ein 2020 gebauter Elektro- oder Brennstoffzellenbus, der mit dem VBZ-Strommix betrieben wird. Auch mit dem CH-Strommix liegen die gesamthaften Treibhausgasemissionen eines Elektrobusses noch rund 2- 3-mal niedriger als diejenigen eines Dieselbusses (siehe Tabelle 6).

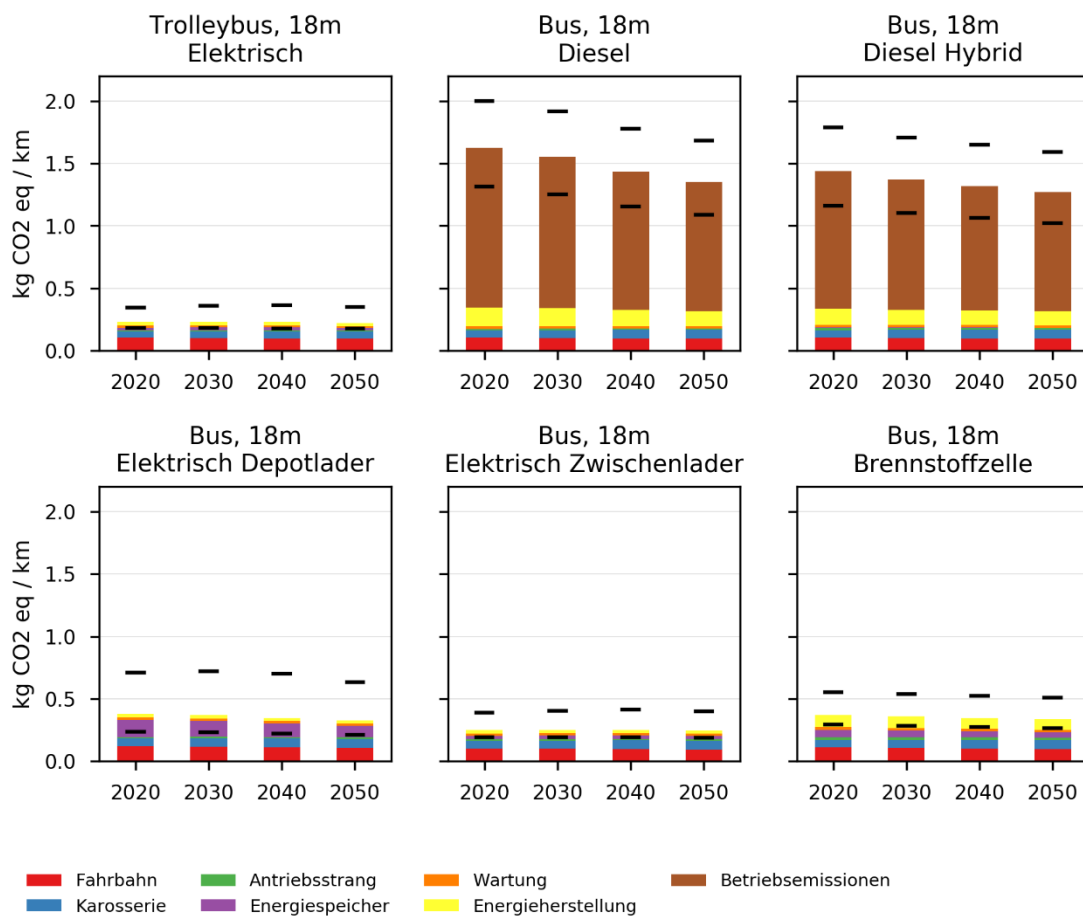
Bei Batteriebusen liegen die WorstCase-Werte noch deutlich unter den BestCase-Werten der Dieselbussen.

Tabelle 6: Treibhausgasemissionen-Vergleich von 2020 gebauten Bussen

Fahrzeug	Herstellungsjahr	Strom Herstellung	Treibhausgasemissionen (kg CO ₂ eq / km)	Vergleich Dieselbus
Trolleybus, 18m, Elektrisch	2020	CH-Strommix	0.500	31%
Bus, 18m, Diesel	2020	VBZ-Strommix	0.231	14%
Bus, 18m, Diesel Hybrid	2020	N/A	1.625	100%
Bus, 18m, Elektrisch Depotlader	2020	N/A	1.440	89%
Bus, 18m, Elektrisch Zwischenlader	2020	CH-Strommix	0.617	38%
Bus, 18m, Elektrisch Zwischenlader	2020	VBZ-Strommix	0.379	23%
Bus, 18m, Elektrisch Zwischenlader	2020	CH-Strommix	0.488	30%
Bus, 18m, Elektrisch Zwischenlader	2020	VBZ-Strommix	0.250	15%
Bus, 18m, Brennstoffzelle	2020	N/A	1.029	63%
Bus, 18m, Brennstoffzelle	2020	N/A	0.371	23%

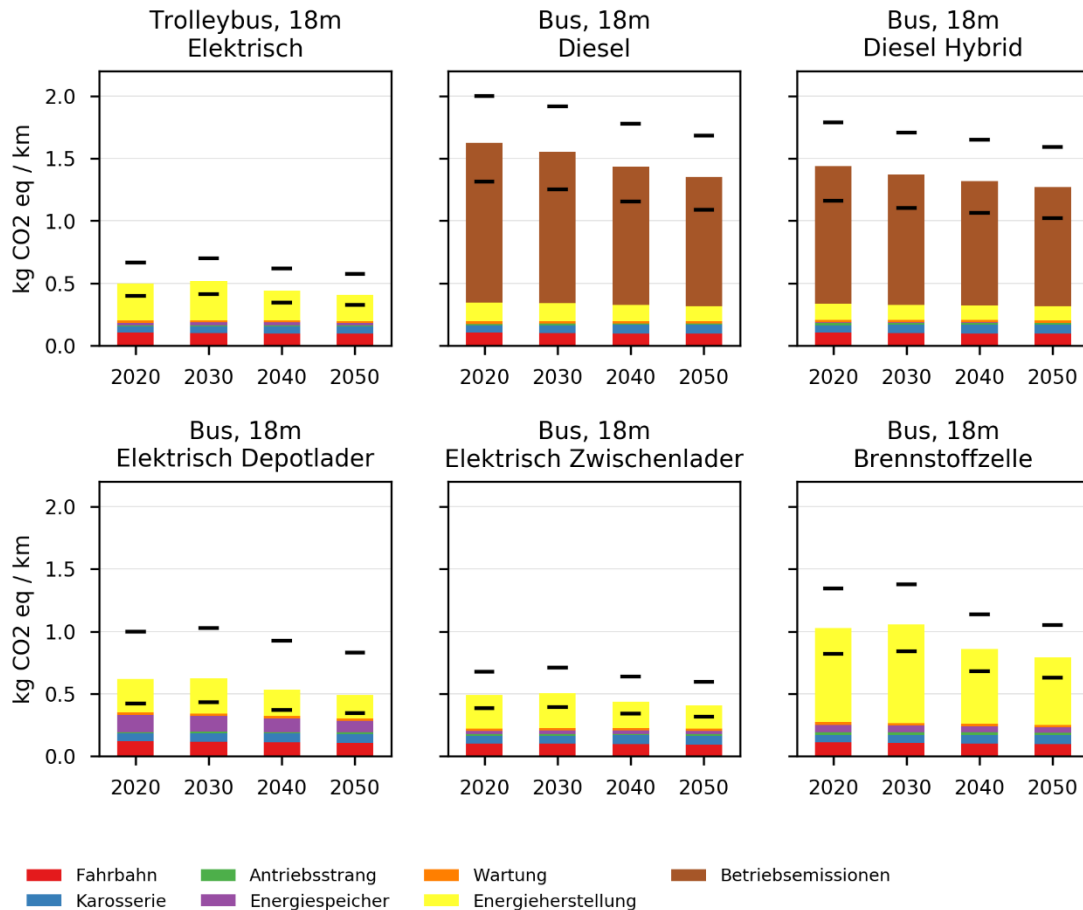
Tabelle INFRAS, PSI, Quantis.

Abbildung 3 Treibhausgasemissionen (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit VBZ-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

Abbildung 4 Treibhausgasemissionen (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit CH-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

3.2.2. Primärenergieverbrauch gesamt

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen den gesamten Primärenergieverbrauch (erneuerbar und nicht-erneuerbar) mit dem VBZ- bzw. dem CH-Strommix. Im Vergleich zu Dieselnissen haben Batterie- und Trolleybusse mit VBZ-Strom einen deutlich tieferen gesamten Primärenergieverbrauch. Besonders bemerkenswert ist aber, dass die verbrauchte Primärenergie bei den Elektrobussen weitgehend aus erneuerbaren Quellen stammt, während Dieselnisse fast ausschließlich mit nicht-erneuerbaren Energie betrieben werden⁷. Mit Schweizer Durchschnittstrom kommen Batterie- und Trolleybusse auf einen ähnlichen Primärenergieverbrauch wie Dieselnisse, wobei auch hier grosse Unterschiede zwischen dem Anteil erneuerbarer und

⁷ Die Treibstoffherstellung wird zwar als 100% fossil angenommen, aber ein kleiner Anteil des Primärenergieverbrauchs der Vor-kette stammt aus erneuerbaren Quellen, z.B. vom Strommix, der für die Fahrzeugherstellung verwendet wird.

nicht-erneuerbarer Energie bestehen. Bei den Elektrovarianten ergibt sich zwischen 2030 und 2040 im Modell eine deutliche Reduktion des nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarfs, was auf den deutlich sinkenden Anteil des Atomstroms zwischen 2030 und 2040 im CH-Strommix zurückzuführen ist (siehe Tabelle 3).

Die Brennstoffzellenbusse verbrauchen aufgrund ihres geringen Wirkungsgrades bei der Treibstoffbereitstellung insgesamt sogar mehr Primärenergie als Dieselsebusse und deutlich mehr als Batteriebusse.

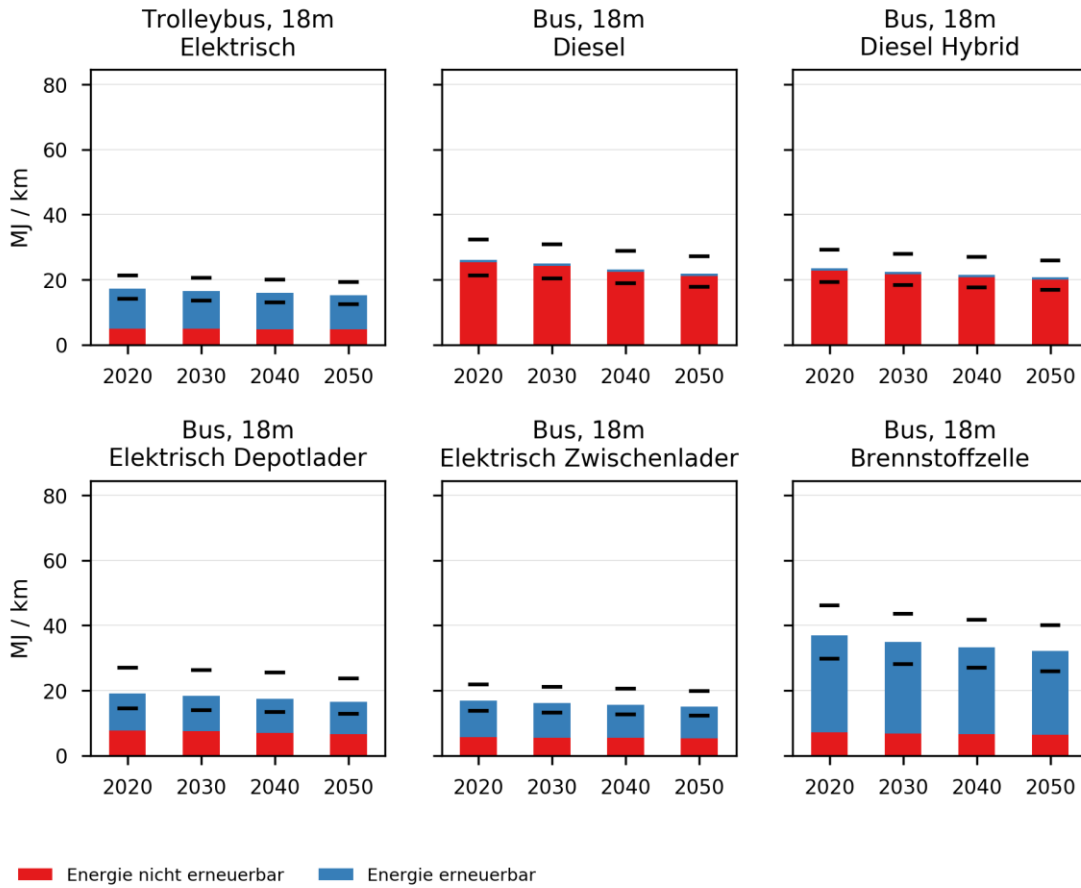
Neben der Antriebsart wirkt sich auch der Strommix deutlich auf den Primärenergiebedarf aus. Im Vergleich zu Elektrobussen, die mit dem Schweizer Durchschnittsstrom (CH-Strommix) betrieben werden, weisen elektrische Busse, die mit dem 100% erneuerbaren VBZ-Strommix betrieben werden, meistens einen weniger hohen Gesamt-Primärenergieverbrauch auf. Gleichzeitig ist deren erneuerbarer Primärenergieverbrauch höher, während der nicht-erneuerbare Primärenergieverbrauch tiefer ist im Vergleich zu mit CH-Strommix betriebenen Elektrobussen. Siehe Tabelle 7.

Tabelle 7: Primärenergieverbrauchs-Vergleich von 2020 gebauten Bussen

Fahrzeug	Herstellungsjahr	Stromherstellung	Primärenergieverbrauch (MJ/km)		
			Erneuerbar	Nicht-erneuerbar	Gesamt
Trolleybus, 18m, Elektrisch	2020	CH-Strommix	9.0	18.6	27.6
Bus, 18m, Diesel	2020	N/A	0.8	25.3	26.1
Bus, 18m, Diesel Hybrid	2020	N/A	0.8	22.7	23.5
Bus, 18m, Elektrisch Depotlader	2020	CH-Strommix	8.6	19.8	28.4
Bus, 18m, Elektrisch Zwischenlader	2020	VBZ-Strommix	11.5	7.7	19.2
Bus, 18m, Brennstoffzelle	2020	CH-Strommix	8.4	17.7	26.1
	2020	VBZ-Strommix	11.3	5.6	16.9
	2020	N/A	22.0	40.5	62.5
	2020	N/A	29.9	7.0	37.0

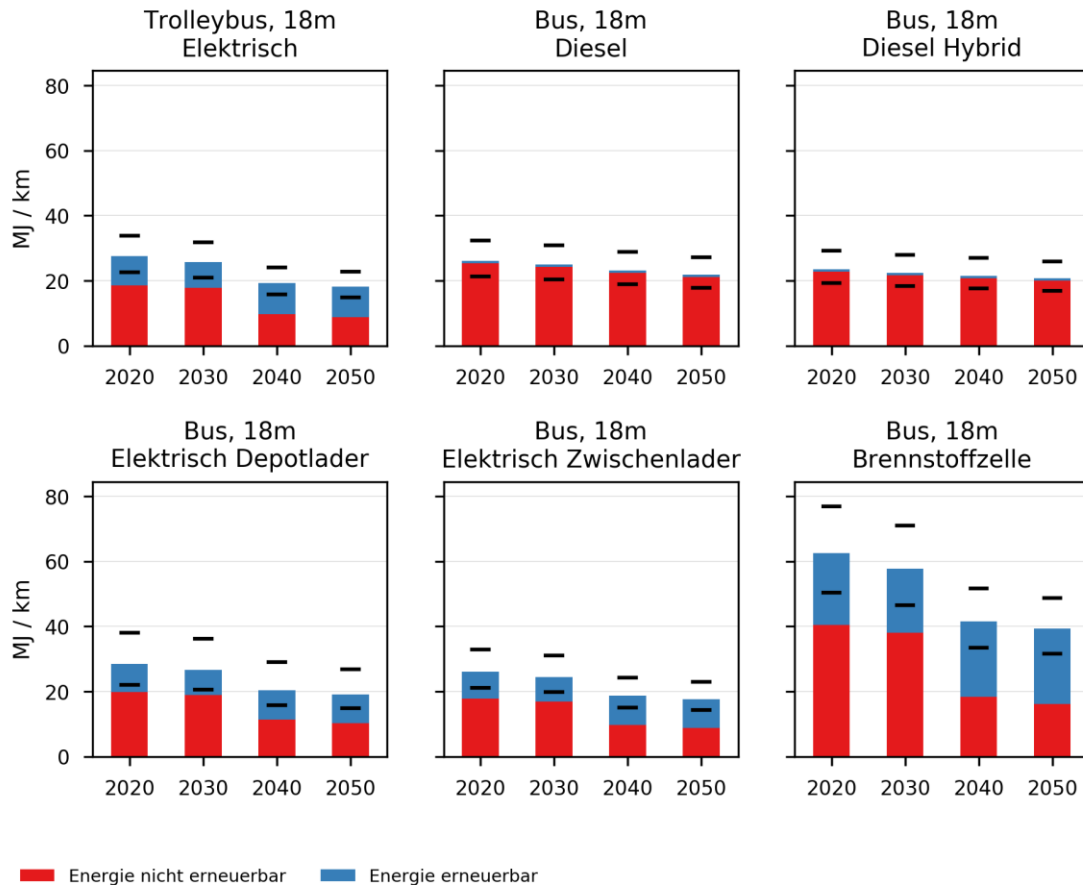
Tabelle INFRAS, PSI, Quantis.

Abbildung 5 Primärenergieverbrauch gesamt (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit VBZ-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

Abbildung 6 Primärenergieverbrauch gesamt (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit CH-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis

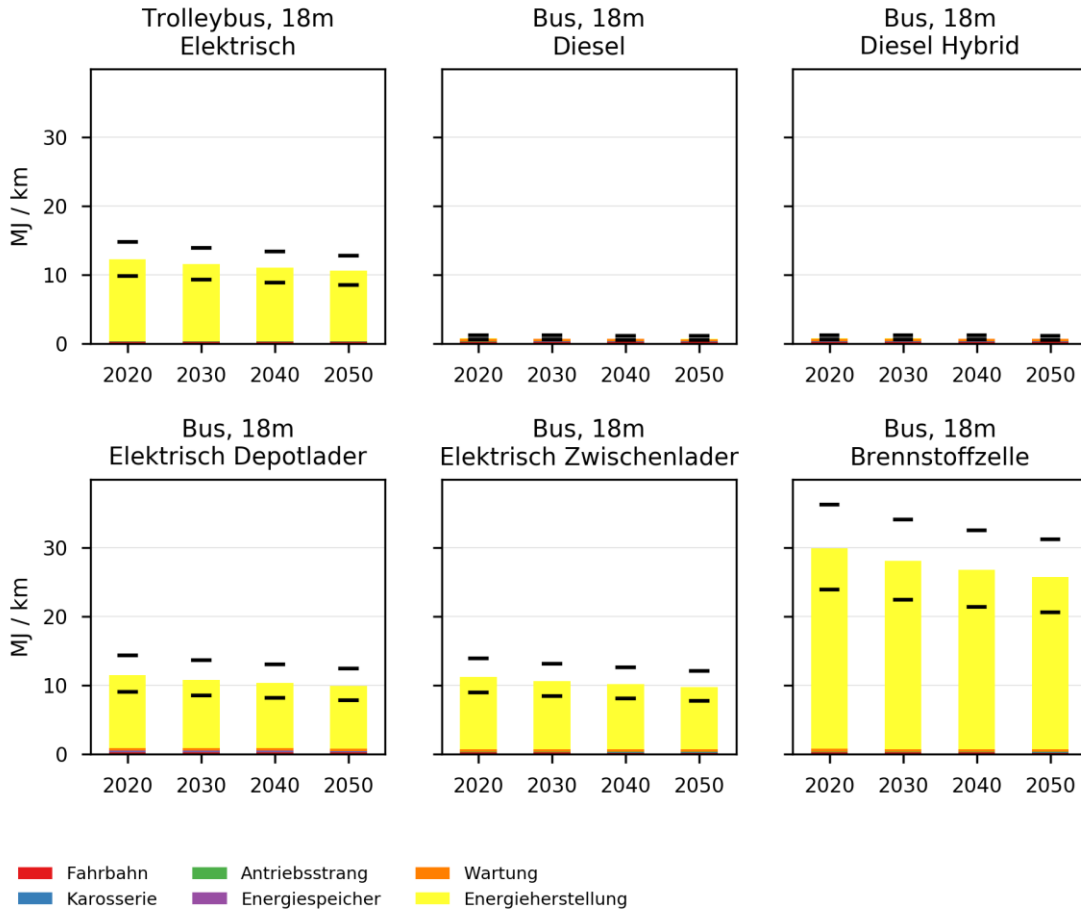
3.2.3. Primärenergieverbrauch erneuerbar

Der erneuerbare Teil des Primärenergieverbrauchs von Bussen kommt hauptsächlich aus der Energieherstellung für den Betrieb. Fossil betriebene Fahrzeuge weisen ebenfalls einen sehr kleinen Bedarf von erneuerbarer Energie auf. Dieser Verbrauch fällt bei der Buserstellung an, für die der globale durchschnittliche Strommix angenommen wird. Dieser hat einen Anteil an erneuerbaren Quellen.

Aufgrund des relativ hohen Anteils an Kernenergie im Schweizer Strommix ist der erneuerbare Anteil am Primärenergiebedarf dort tiefer als bei der Verwendung von VBZ-Strom.

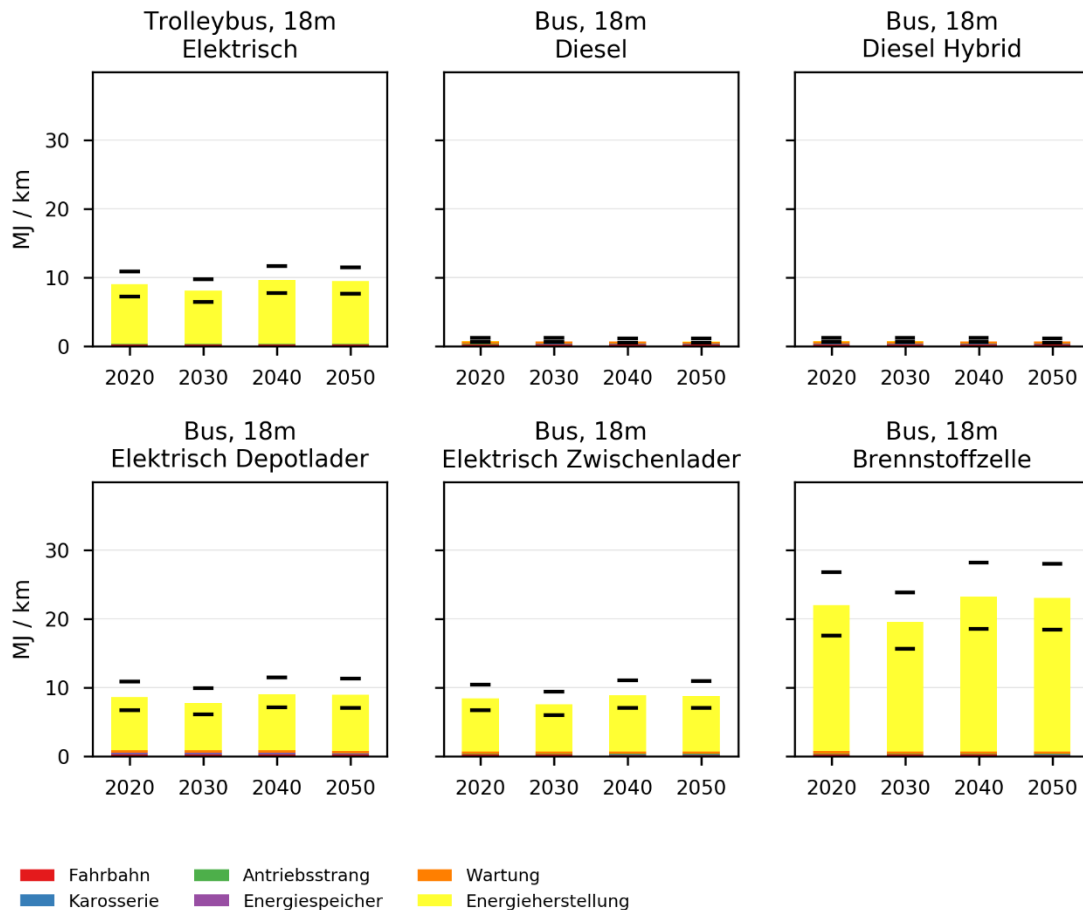
Die Herstellung von Wasserstoff aus Strom für den Betrieb von Brennstoffzellenbussen braucht pro km mehr als doppelt so viel Primärenergie wie die Strombereitstellung, um Batteriebusse zu betreiben. Dies weil die Umwandlung von Strom zu Wasserstoff (Elektrolyse) und zurück zu Strom (Brennstoffzelle) mit relativ grossen Verlusten verbunden ist.

Abbildung 7 Primärenergieverbrauch erneuerbar (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit VBZ-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

Abbildung 8 Primärenergieverbrauch erneuerbar (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit CH-Strommix gerechnet)

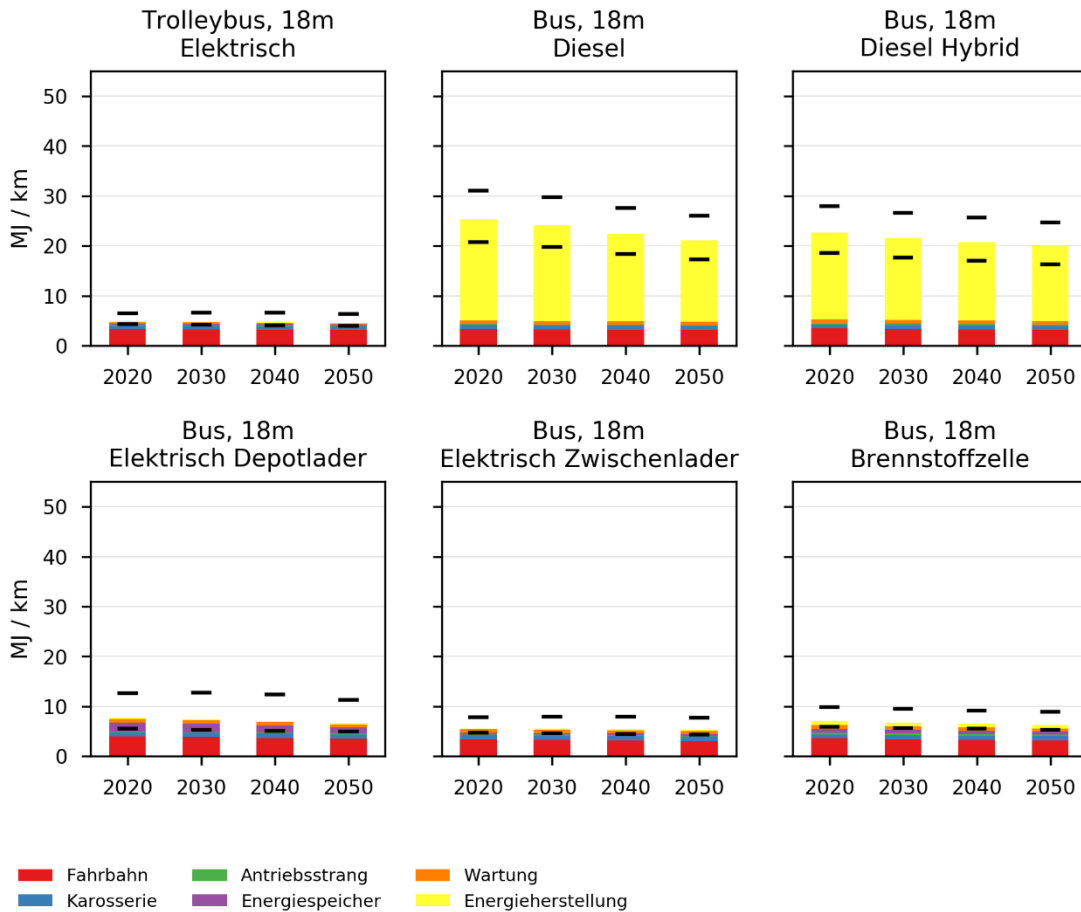


Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

3.2.4. Primärenergieverbrauch nicht erneuerbar

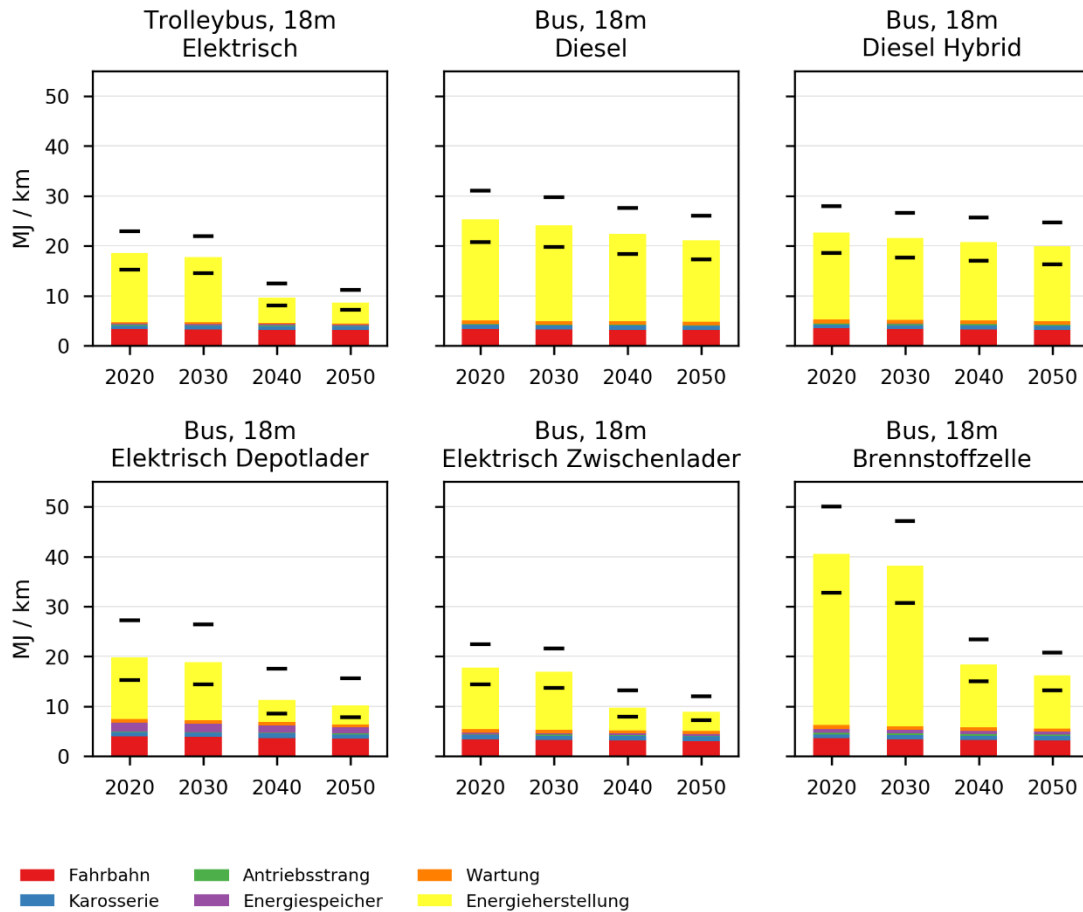
Zur Herstellung von Bussen und der Fahrbahn wird vor allem nicht-erneuerbare Energie verbraucht. Für die Buserstellung wird der globale Strommix angenommen. Strassenbau wird zwar in der Schweiz angenommen, aber die Hauptenergiequelle hier ist Diesel, nicht Strom. Im Vergleich zum Primärenergieverbrauch von Dieselmotoren sind die Anteile der Fahrzeug- und Infrastrukturherstellung relativ klein. Fossil betriebene Fahrzeuge haben insgesamt einen viel höheren nicht-erneuerbaren Primärenergiebedarf als Elektrofahrzeuge, die mit dem VBZ-Strommix betrieben werden.

Abbildung 9 Primärenergieverbrauch nicht erneuerbar (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit VBZ-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

Abbildung 10 Primärenergieverbrauch nicht erneuerbar (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit CH-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

3.2.5. Stickoxidemissionen (NO_x) im Lebenszyklus

Abbildung 11 zeigt die NO_x-Emissionen im Lebenszyklus von 18m-Bussen. Die braunen Säulen sind die Emissionen, die während der Fahrt ausgestossen werden. Diesbezüglich schneiden die Elektrobusse mit Null Emission natürlich viel besser ab als die Dieselbusse.

Der grösste Teil der Lebenszyklus NO_x-Emissionen stammt jedoch aus den Vorketten. Also z.B. aus der Herstellung der Fahrzeuge, der Raffinierung der Rohmaterialien und der Stromversorgung in den Produktionsketten.

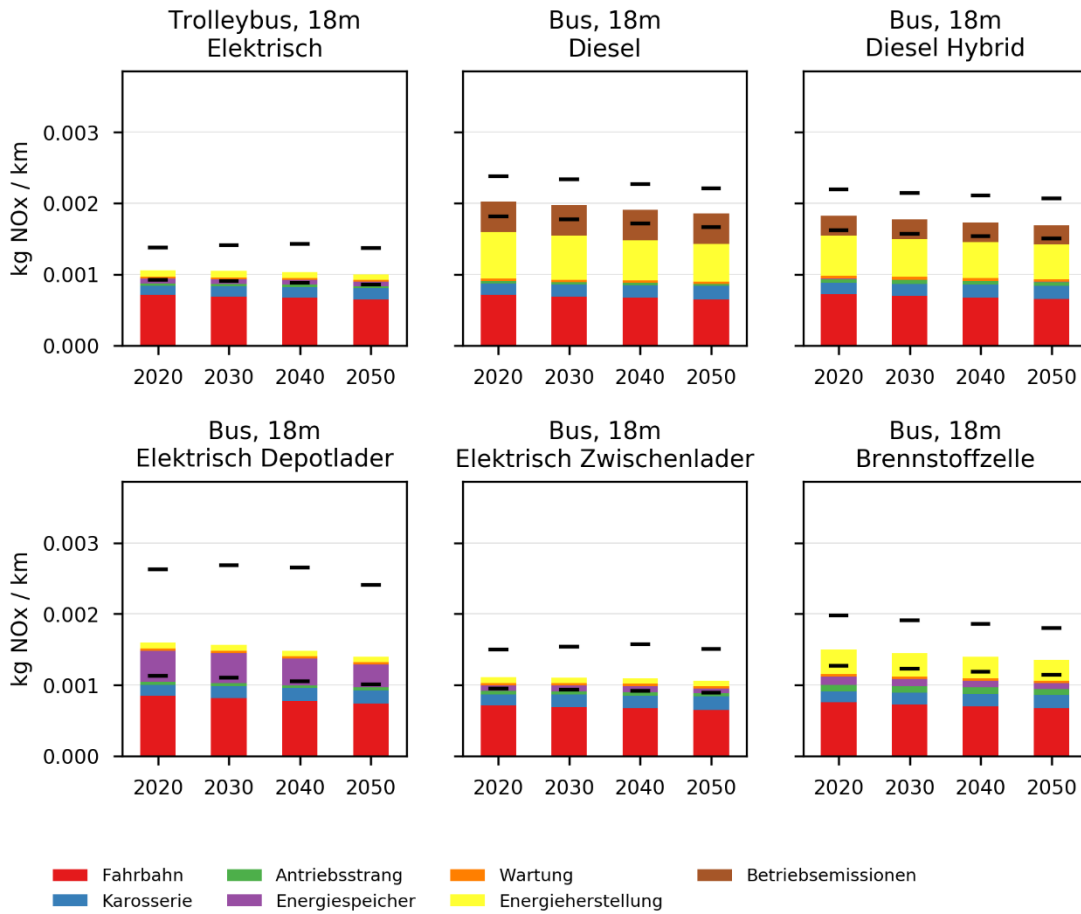
Die grossen Spannweiten für Batterie-, und Brennstoffzellen-Fahrzeuge stammen aus den Schwankungsbereichen bei den Emissionen aus der Herstellung von Batterien, Brennstoffzellen

und Wasserstofftanks sowie aus den Unsicherheiten bei den Parametern für die Lebensfahrleistung, den Batterie- und Brennstoffzellen-Ersatz und die Energie-/Leistungsdichte dieser Komponenten.

Im Lebenszyklus von Personenwagen sind die NO_x-Emissionen für alle Antriebstypen ähnlich (siehe Studie «Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext»). Für Trolleybusse und Batteriebusse sieht die Situation etwas anders aus. Im Vergleich zu Personenwagen haben 18m-Busse sehr hohe Lebensfahrleistungen. Dadurch verlieren Emissionen von der Fahrzeugherstellung pro gefahrenem Kilometer an Relevanz. Im Gegensatz dazu sind Emissionen aus der Energieherstellung und aus dem direkten Betrieb wichtiger. Da der VBZ-Strommix sehr geringe NO_x-Emissionen hat, schneiden Elektrobusse, die mit diesem Strommix betrieben werden, sehr gut ab. Die Basis- und BestCase-Werte liegen deutlich unter denen von Diesel- oder Hybridbussen. Aufgrund der grossen Unsicherheit bei den Elektrobusen liegen die WorstCase-Werte für Depotlader in einem ähnlichen Bereich wie die für Dieselbusse. Alle anderen Elektrobusse liegen auch im WorstCase deutlich tiefer.

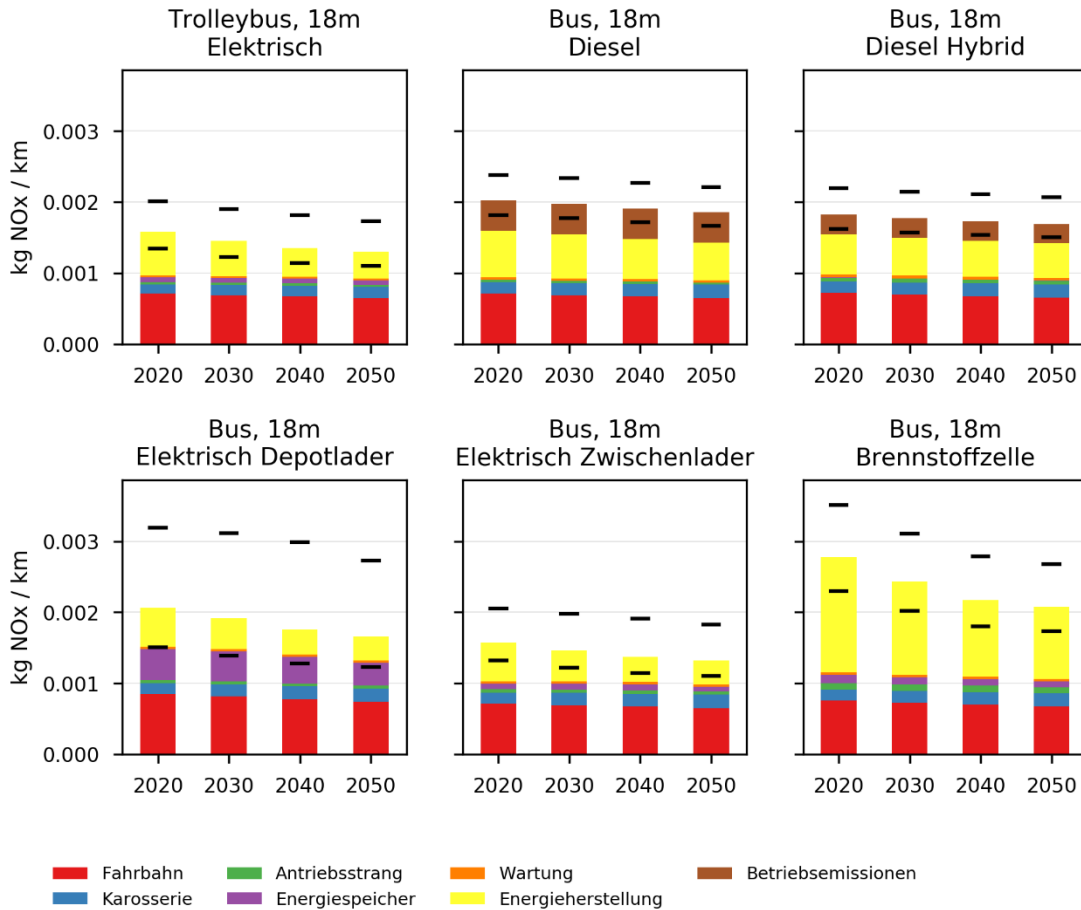
Elektrobusse, die mit dem Schweizer Durchschnittsstrom betrieben werden, schneiden weniger gut ab als Elektrobusse, die mit dem VBZ-Strommix betrieben werden. Das liegt vor allem an dem (geringen) Anteil an importiertem Fossilstrom mit hohen NO_x-Emissionen (Abbildung 12). Besonders auffällig ist der Unterschied zwischen den Strommischen bei den Brennstoffzellenbussen, da sie für die Wasserstoffherstellung mehr Strom pro Kilometer benötigen als Batteriebusse zum Laden der Batterie. Mit dem Schweizer Durchschnittsstrom liegen die NO_x-Emissionen aus dem Lebenszyklus von Depotladern im selben Bereich wie die von Diesel- und Hybridbussen. Die Emissionen von Brennstoffzellenbussen liegen deutlich höher, die von Trolleys und Zwischenladern deutlich tiefer.

Abbildung 11 Lebenszyklus NO_x-Emissionen (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit VBZ-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

Abbildung 12 Lebenszyklus NO_x-Emissionen (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit CH₄-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

3.2.6. Feinstaubemissionen (PM₁₀) im Lebenszyklus

Abbildung 13 zeigt die PM₁₀-Emissionen im Lebenszyklus von 18m-Bussen. Wie bereits im Bericht "Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext" erläutert, sind Aussagen zu den tatsächlichen Gesundheitseffekten der kumulierten PM₁₀-Emissionen von Fahrzeugen praktisch nicht möglich. Die gesundheitlichen Auswirkungen der PM₁₀-Emissionen sind sehr komplex und müssen mit Vorsicht interpretiert werden. Partikel von unterschiedlicher Grösse und chemischer Zusammensetzung haben sehr unterschiedliche Auswirkungen auf die Gesundheit, zu denen wir hier keine Aussagen machen können.

Der grösste Teil der PM₁₀-Emission kommt aus der Vorkette, hauptsächlich aus der Fahrbahn- und Fahrzeugherstellung, sowie der Herstellung von Batterien, Brennstoffzellen und

Wasserstofftanks. Diese werden hauptsächlich über den Stromverbrauch (Vorketten) und die Aufarbeitung von Metallen wie Nickel, Kupfer und Platin verursacht.

Die Betriebsphasenemissionen stammen aus zwei Quellen: Verbrennungsfahrzeuge emittieren PM_{10} durch die Treibstoffverbrennung. Alle Fahrzeuge erzeugen auch PM_{10} durch Bremsen-, Pneu- und Strassen-Abrieb.

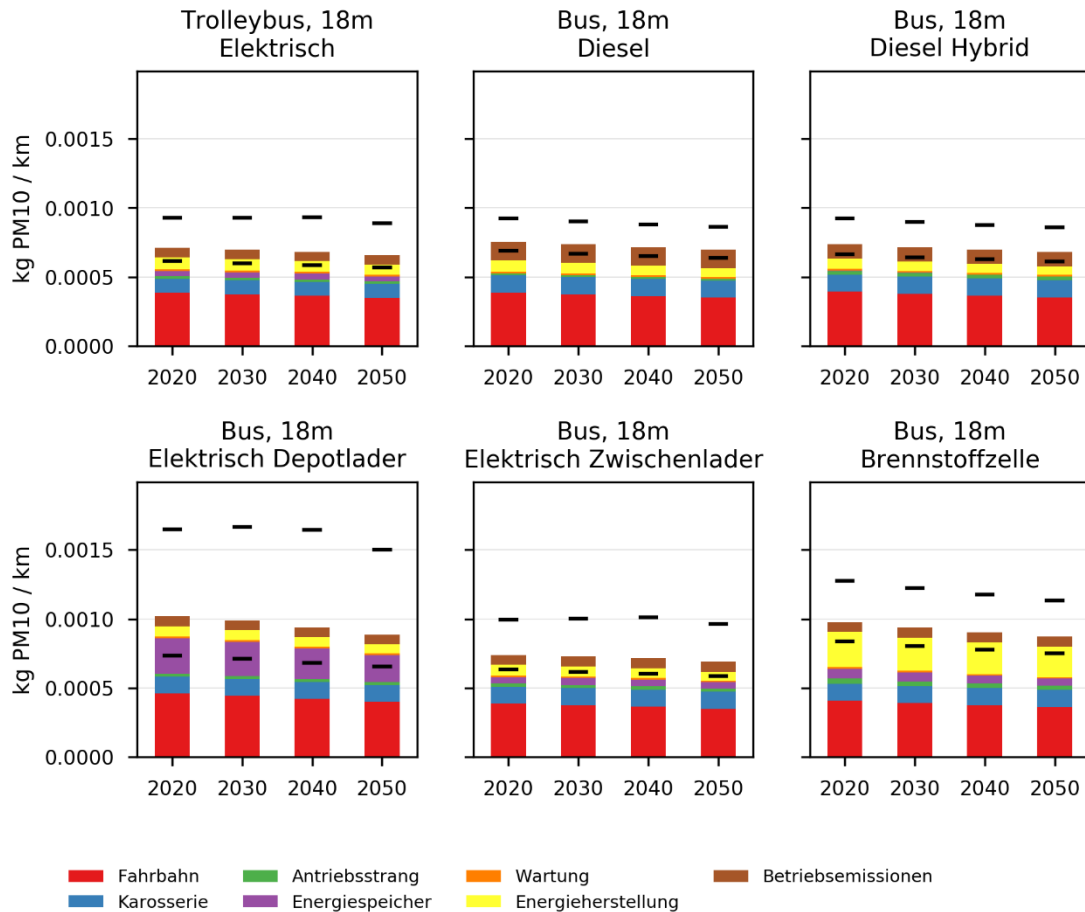
Die PM_{10} -Emissionen in den Abgasen von Dieseln sind dank Partikelfilter in den letzten Jahren enorm gesunken. Damit ist bei neuen Bussen (Euro VI) der Strassenabrieb für den grössten Teil der PM_{10} -Emissionen in der Nutzungsphase verantwortlich. Allerdings sind die Verbrennungsemissionen immer noch die Hauptquelle für die kleineren, gesundheitsschädlicheren $PM_{2.5}$ -Emissionen. Diese machen aufgrund ihrer geringen Grösse nur einen sehr kleinen Teil der Partikelmasse aus, obwohl sie bezüglich Partikelanzahl in Abgasen dominant sind. Bezüglich der kleineren Partikel bieten Elektrobusse somit deutliche Vorteile gegenüber Verbrennungsmotoren.

Bei den Abriebs-Emissionen ist berücksichtigt, dass Elektrobusse und Hybridbusse dank der Rekuperation im Betrieb weniger bremsen müssen, was zu 50% geringerem Bremsabrieb und dementsprechend zu tieferen PM_{10} -Emissionen führt.

Insgesamt ist klar, dass die Betriebs-PM-Emissionen von Dieseln signifikant höher sind als die von Elektrobusen. Es darf auch davon ausgegangen werden, dass dasselbe für die Gesundheitseffekte aufgrund von diesen Emissionen der Fall ist.

Die Ergebnisse, die mit dem Schweizer Durchschnittsstrom gerechnet worden sind, sehen ähnlich aus und werden deswegen hier nicht separat gezeigt.

Abbildung 13 Lebenszyklus PM₁₀-Emissionen (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit VBZ-Strommix gerechnet)



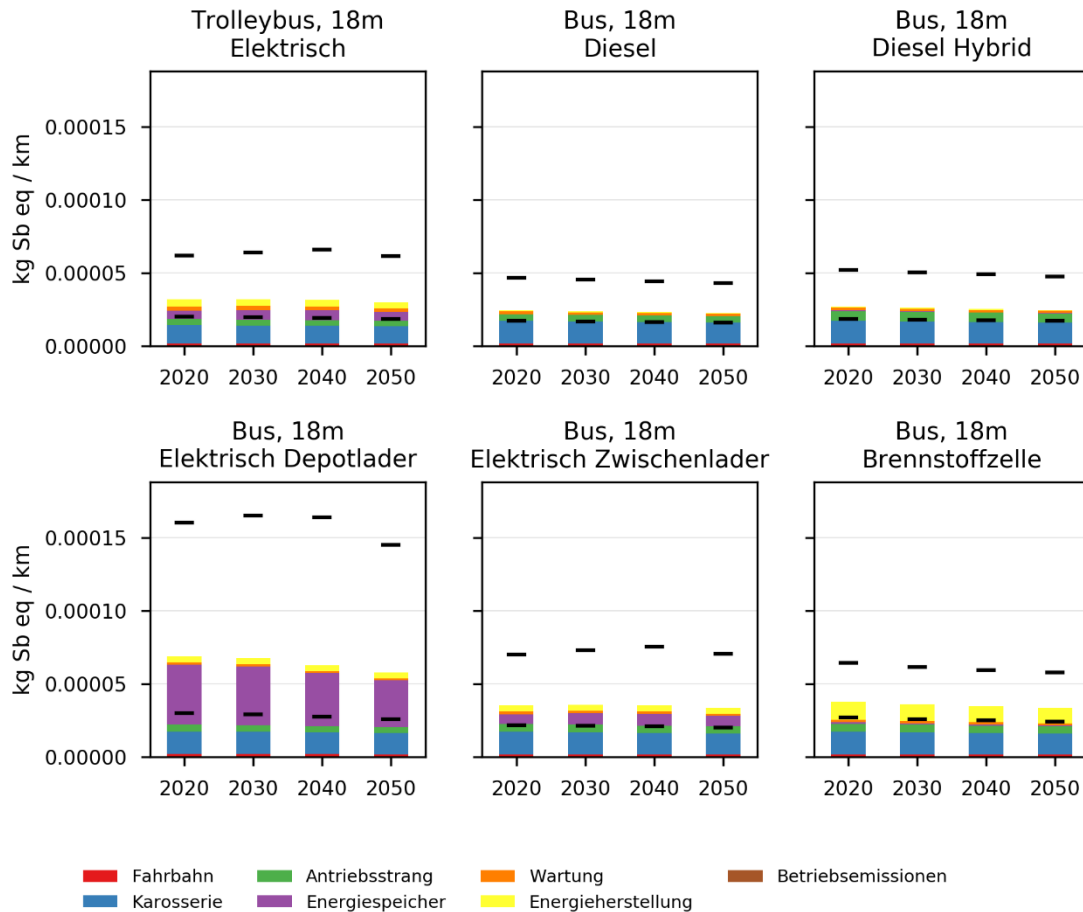
Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

3.2.7. Rohstoffverbrauch

Abbildung 14 zeigt die Ergebnisse des Rohstoffverbrauchs von 18m-Bussen. Rohstoffverbräuche pro km sind stark von der Lebensfahrleistung abhängig, was die grossen Streuungsbereiche erklärt. Depotlader weisen den grössten Streuungsbereich auf, da sie die grössten Rohstoffverbräuche in der Herstellung haben.

Allgemein sind die Ergebnisse zum Rohstoffverbrauch mit Vorsicht zu interpretieren, da die Cut-off-Modellierung von ecoinvent und die gewählte Wirkungsabschätzungsmethode nicht zusammenpassen. Daher wird zu wenig berücksichtigt, dass beim Recycling Rohstoffe zurückgewonnen werden, was zu einer systematischen Benachteiligung von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen führt.

Abbildung 14 Rohstoffverbrauch (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit VBZ-Strommix gerechnet)



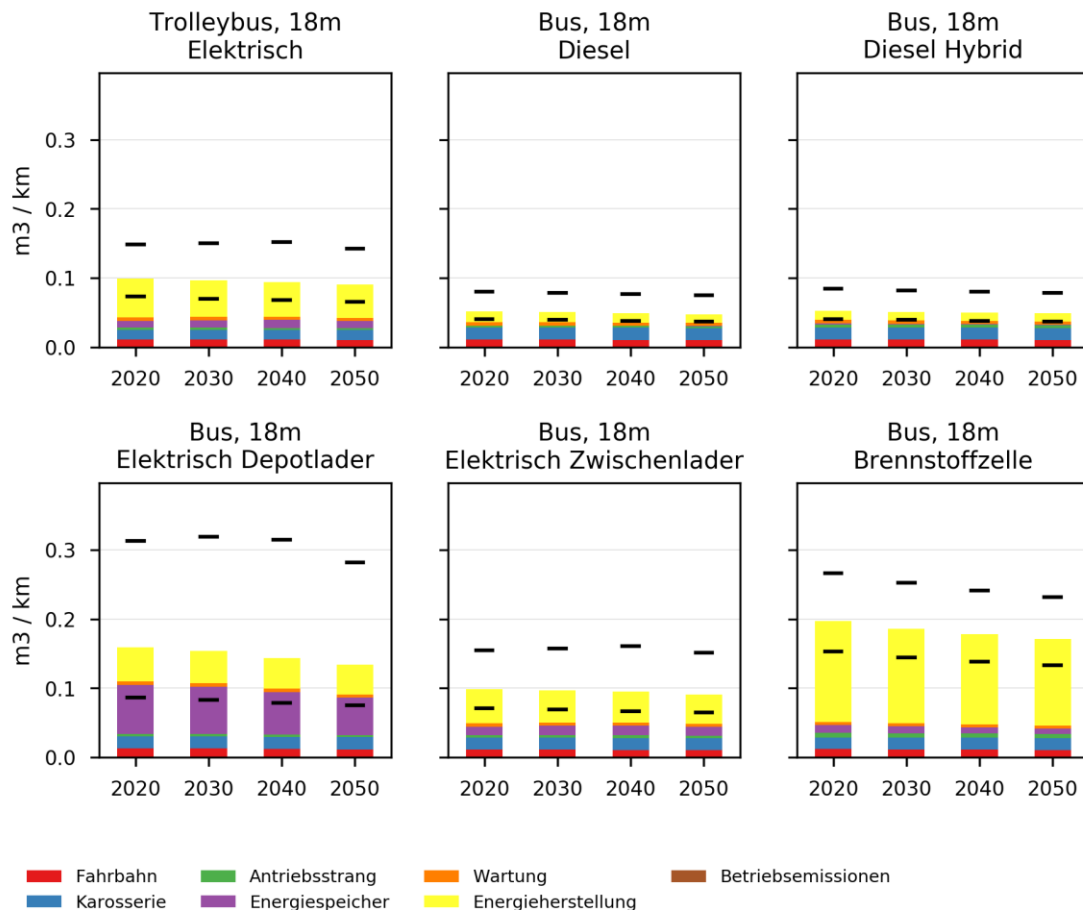
Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

3.2.8. Wasserverbrauch

Abbildung 15 zeigt die Wasserverbrauchsergebnisse für 18m-Busse. Die höheren Wasserverbräuche für Batterie- und Brennstoffzellen-Fahrzeuge beruhen vor allem auf dem Strombedarf im Betrieb: durch Verdunstung in Schweizer Stauseen besteht ein hoher Wasserverlust. Die Herstellung von Batterien für Depotlader weist ebenfalls einen hohen Wasserverbrauch auf. Dieser stammt nicht wie häufig erwartet von Lithium-Gewinnungsprozessen, sondern aus der Herstellung verschiedener Zwischenprodukte (Hauptsächlich Butan-1,4-diol und Natriumhydroxide).

Die Ergebnisse für den Schweizer Durchschnittstrommix sehen ähnlich aus und werden deshalb nicht separat angezeigt.

Abbildung 15 Wasserverbrauch (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit VBZ-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

3.2.9. Ökologische Knappheit (Umweltbelastungspunkte, UBP)

Abbildung 16 zeigt die UBP-Ergebnisse für 18m-Busse. Elektrobusse mit kleinen Batterien zeigen bei dieser Bewertung Vorteile gegenüber Verbrennern. Depotlader zeigen wegen der grossen Batterie ähnliche Resultate wie Verbrenner. Wie in Kap. 2.4 beschrieben ist, stimmt aber die Treibhausgasgewichtung der UBP (aktuellste Version von 2013) nicht mehr mit den aktuellen Vorgaben der Schweizer Klimapolitik (Netto-Null im Jahr 2050) überein. Dieses Ziel bedingt mindestens eine Halbierung des Zielwertes für THG-Emissionen gegenüber dem Wert, der in der UBP-Methodik angewendet wird. Das würde den UBP-Faktor für THG-Emissionen von 0.46 UBP/g CO₂-eq auf über 2 UBP/g CO₂-eq erhöhen. Somit sollte das Gewicht von THG-Emissionen

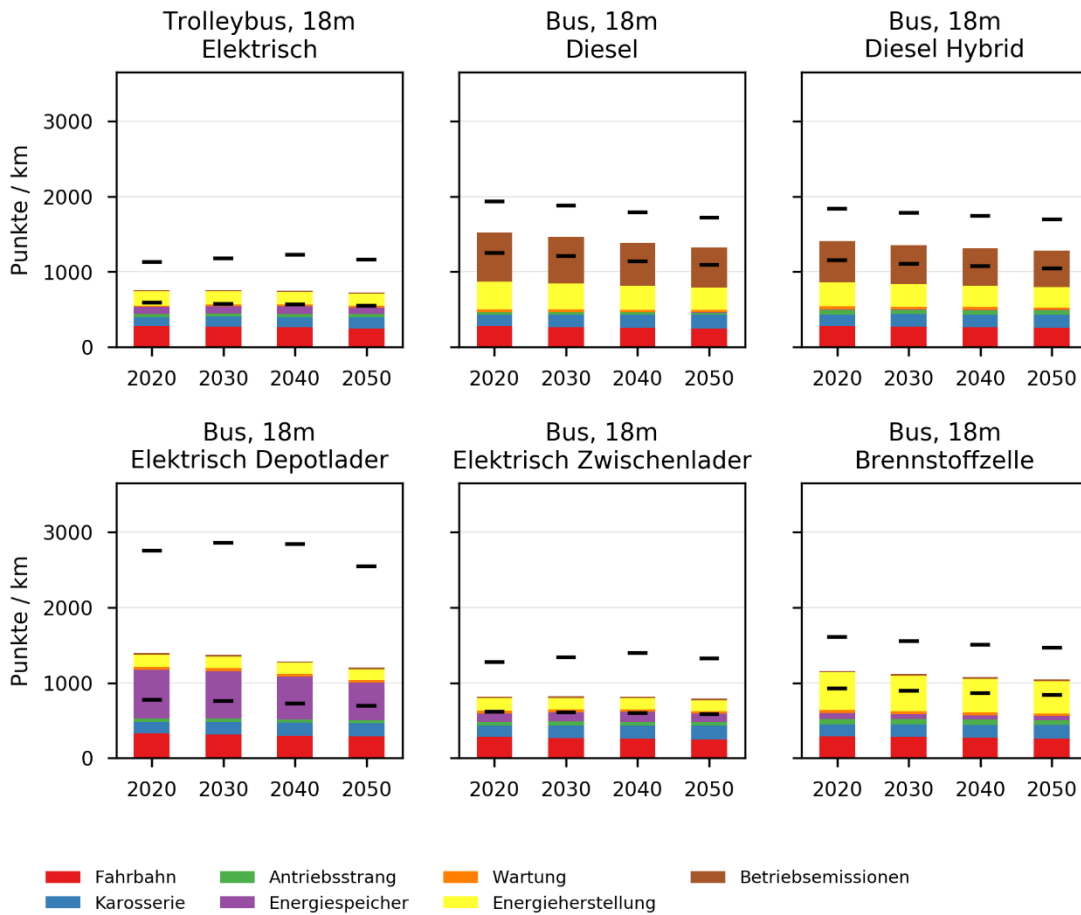
heute um den Faktor 4 höher liegen als in UBP 2013. Mit korrigierten UBP würden die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren deutlich schlechter abschneiden, während die UBP von batterieelektrischen Fahrzeugen viel weniger erhöht würden.

Die UBP aus der Batterieproduktion werden zum Teil von radioaktiven Abfällen verursacht, da Kernenergie Teil der Stromversorgung der Produktionsketten ist und die UBP-Methodik diese mit einem sehr hohen Gewicht bewertet. Auch sehr wichtig für die UBP-Ergebnisse der Batterieherstellung sind die Aufbereitungsprozesse von Kupfer, Nickel, Kobalt und Graphit.

Die grossen Streuungsbereiche, die hier gezeigt werden, ergeben sich primär aus den unsicheren Lebensfahrleistungen und sekundär aus den Unsicherheitsparametern für Batterieersatz und Batterieenergiedichte.

Elektrobusse, die mit Schweizer Durchschnittsstrom betrieben werden, zeigen weniger Vorteile auf als Busse, die mit VBZ-Strom betrieben werden.

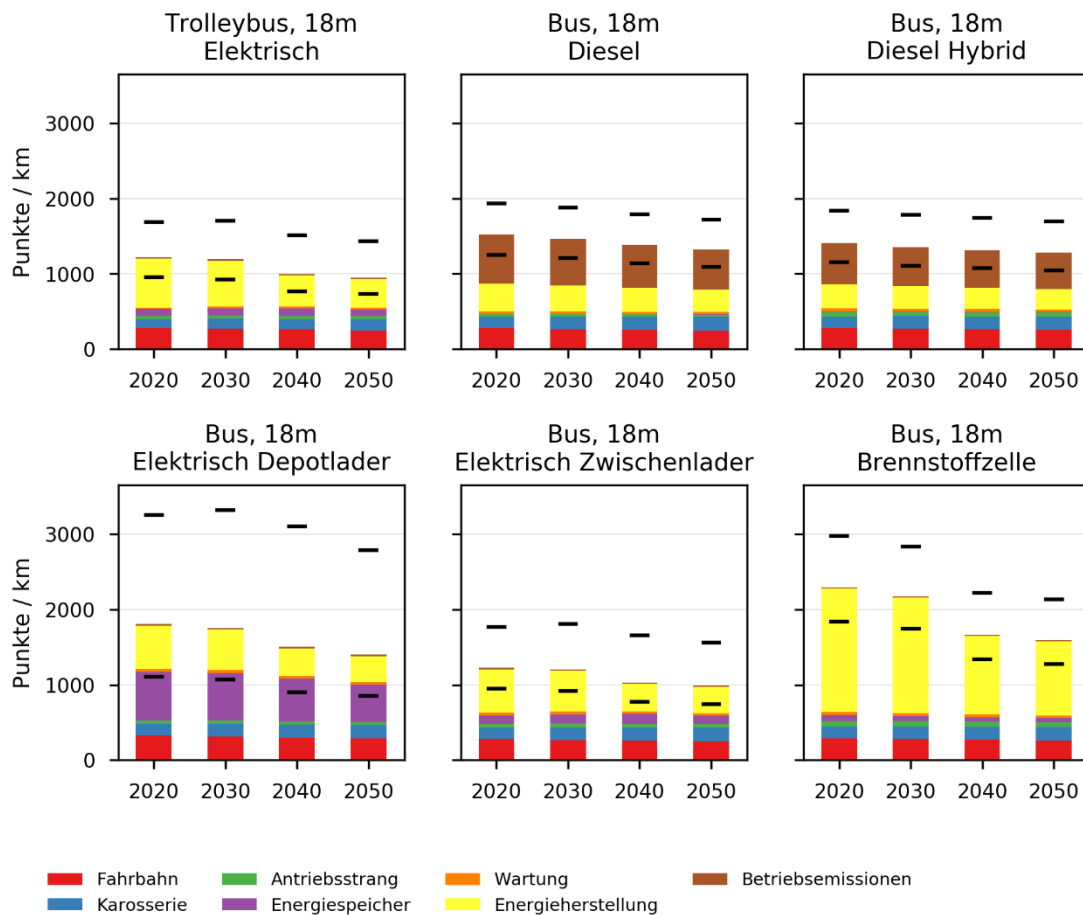
Abbildung 16: Ökologische Knappheit nach Methode der Umweltbelastungspunkte UBP (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit VBZ-Strommix gerechnet)



Die aktuellste Version der UPB (2013) basiert auf inzwischen veralteten Zielen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Mit den aktuellen Zielen des Bundesrats würde den Treibhausgasemissionen etwa viermal mehr Gewicht zugemessen. Da Elektrofahrzeuge bez. Treibhausgasen sehr viel besser abschneiden als Dieselbusse, würden sie bez. UPB noch besser dastehen, als das die Grafik zeigt.

Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

Abbildung 17 Ökologische Knappheit Ergebnisse (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit CH-Strommix gerechnet)



Die aktuellste Version der UPB (2013) basiert auf inzwischen veralteten Zielen zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Mit den aktuellen Zielen des Bundesrats würde den Treibhausgasemissionen etwa viermal mehr Gewicht zugemessen. Da Elektrofahrzeuge bez. Treibhausgasen sehr viel besser abschneiden als Dieselmotoren, würden sie bez. UPB noch besser dastehen, als das die Grafik zeigt.

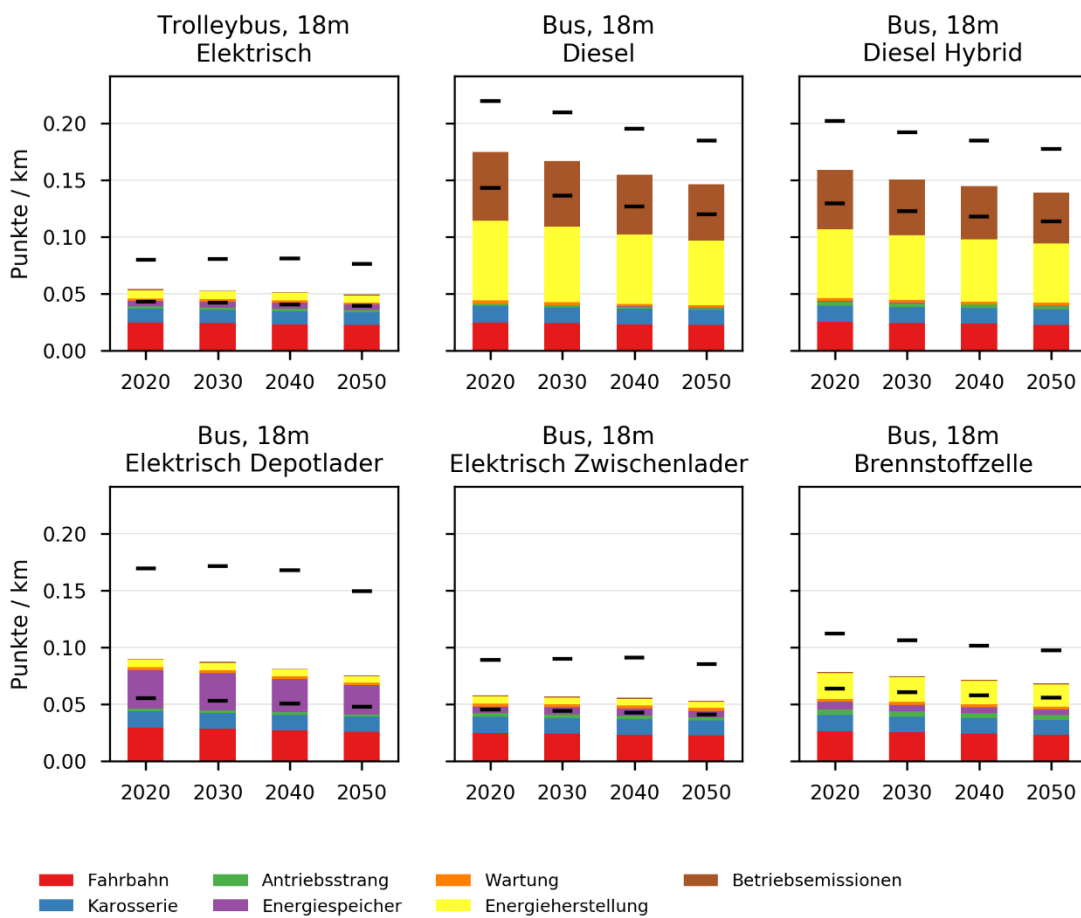
Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

3.2.10. ReCiPe Total

Die ReCiPe Total-Methode berechnet die Schäden, welche an den drei Schutzziele Menschliche Gesundheit, Ökosystemqualität und Ressourcen entstehen. Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse für 18m Busse nach ReCiPe Total gerechnet (VBZ-Strom). Hier schneiden Batteriefahrzeuge deutlich besser ab als Verbrennungsfahrzeuge, da diese Methodik mehr Gewicht auf Treibhausgase legt als zum Beispiel die UPB 2013. Auch hier sind die grossen Streuungsbereiche primär auf die unsicheren Lebensfahrleistungen und sekundär auf die Unsicherheitsparameter für Batterieersatz und Batterieenergiedichte zurückzuführen.

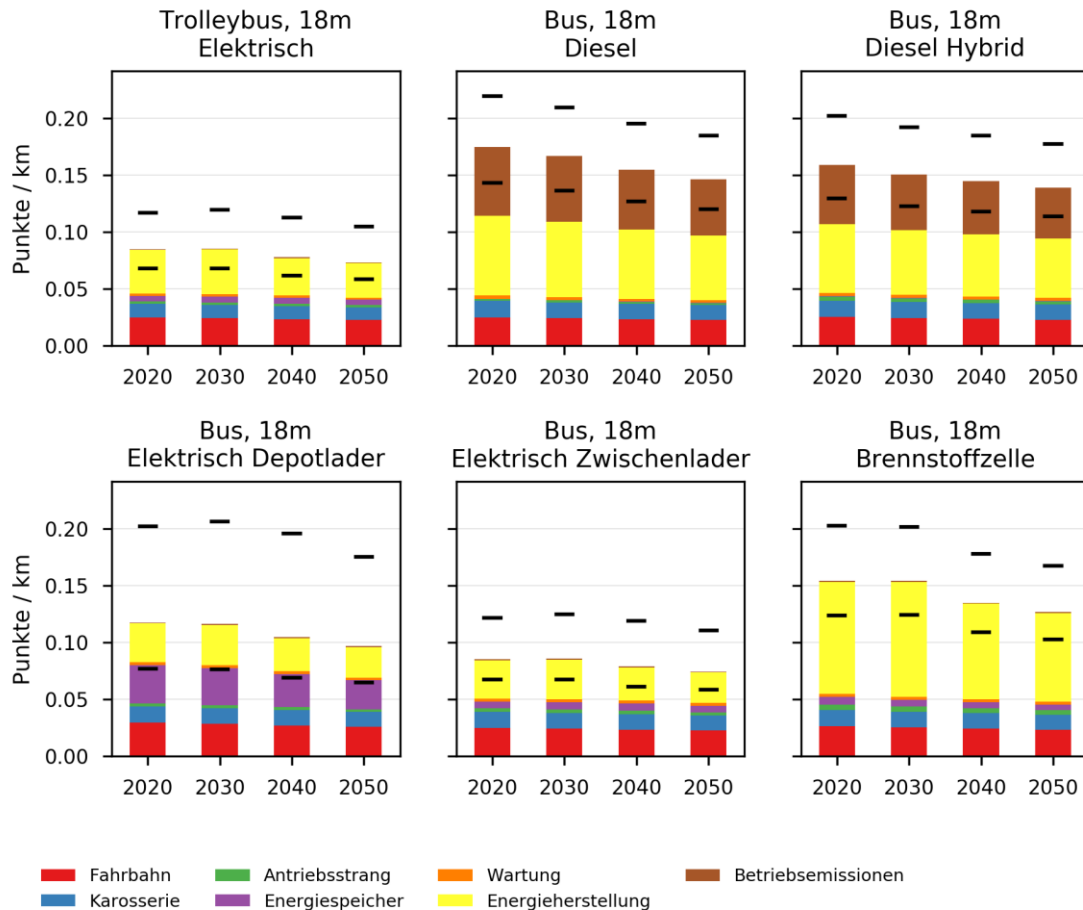
Wenn der Schweizer Durchschnittsstrom angenommen wird, zeigen strombetriebene Trolley- und Batteriebusse immer noch grosse Vorteile auf; Brennstoffzellenbusse mit dem Schweizer Durchschnittsstrommix haben bei dieser Bewertung aber fast keine Vorteile gegenüber Dieseln mehr.

Abbildung 18 ReCiPe Total Ergebnisse (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit VBZ-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

Abbildung 19 ReCiPe Total Ergebnisse (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit CH-Strommix gerechnet)



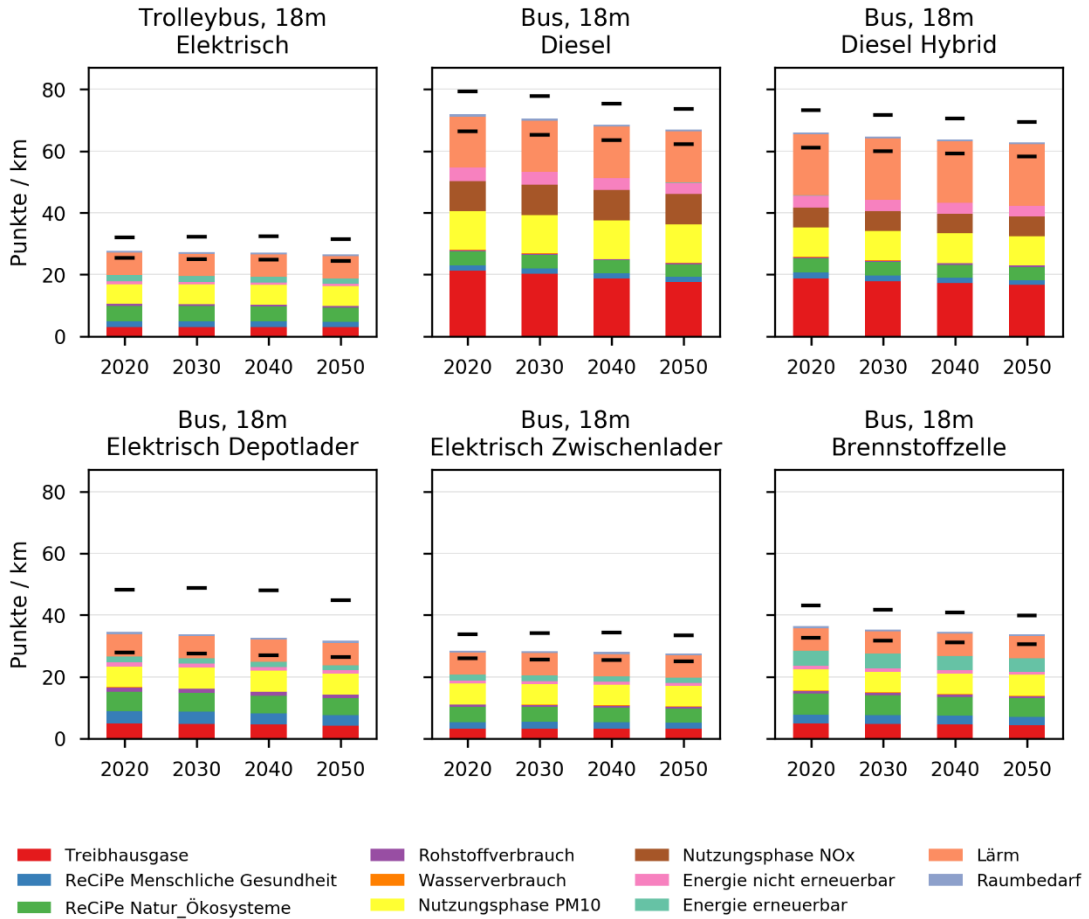
Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

3.3. Ergebnisse Zürich Mobilitäts-Umweltindex (ZMU)

3.3.1. Lokale Perspektive

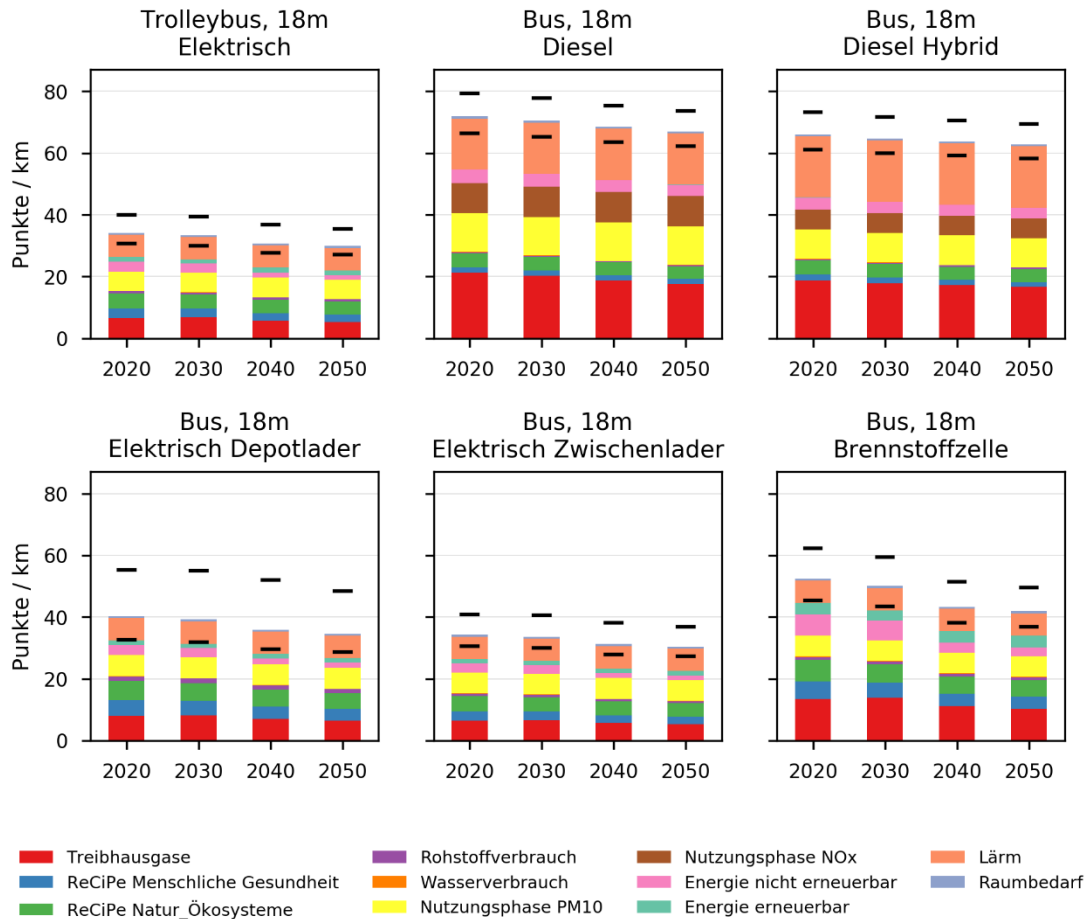
Alle Elektrobusse schneiden unabhängig vom Strommix in dieser Bewertung deutlich besser ab als Busse mit Verbrennungsmotoren. Wenn der Wasserstoff mit dem Schweizer Durchschnittsstrom hergestellt wird, schneiden die Brennstoffzellenbusse aber deutlich schlechter ab als die anderen Elektrobusse.

Abbildung 20 Zürich Mobilitäts-Umweltindex (lokale Perspektive) (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit VBZ-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

Abbildung 21 Zürich Mobilitäts-Umweltindex (lokale Perspektive) (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit CH-Strommix gerechnet)

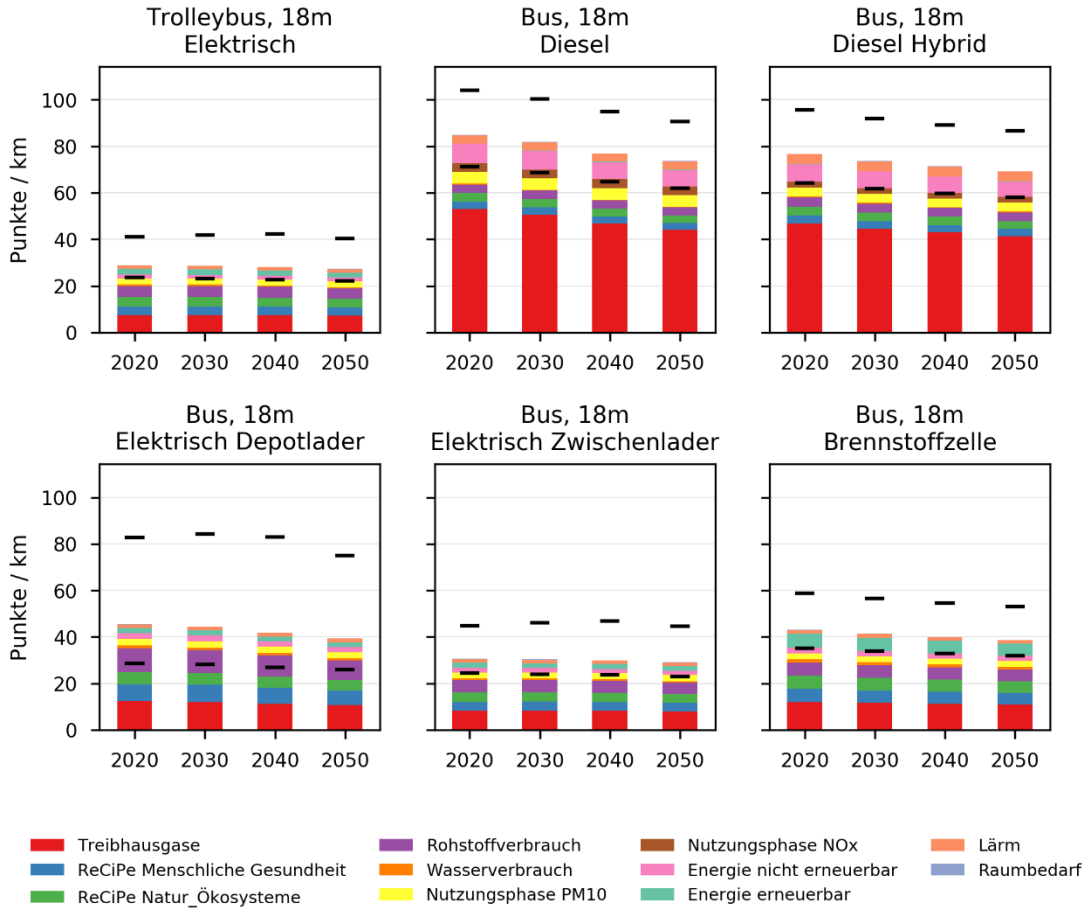


Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

3.3.2. Globale Perspektive

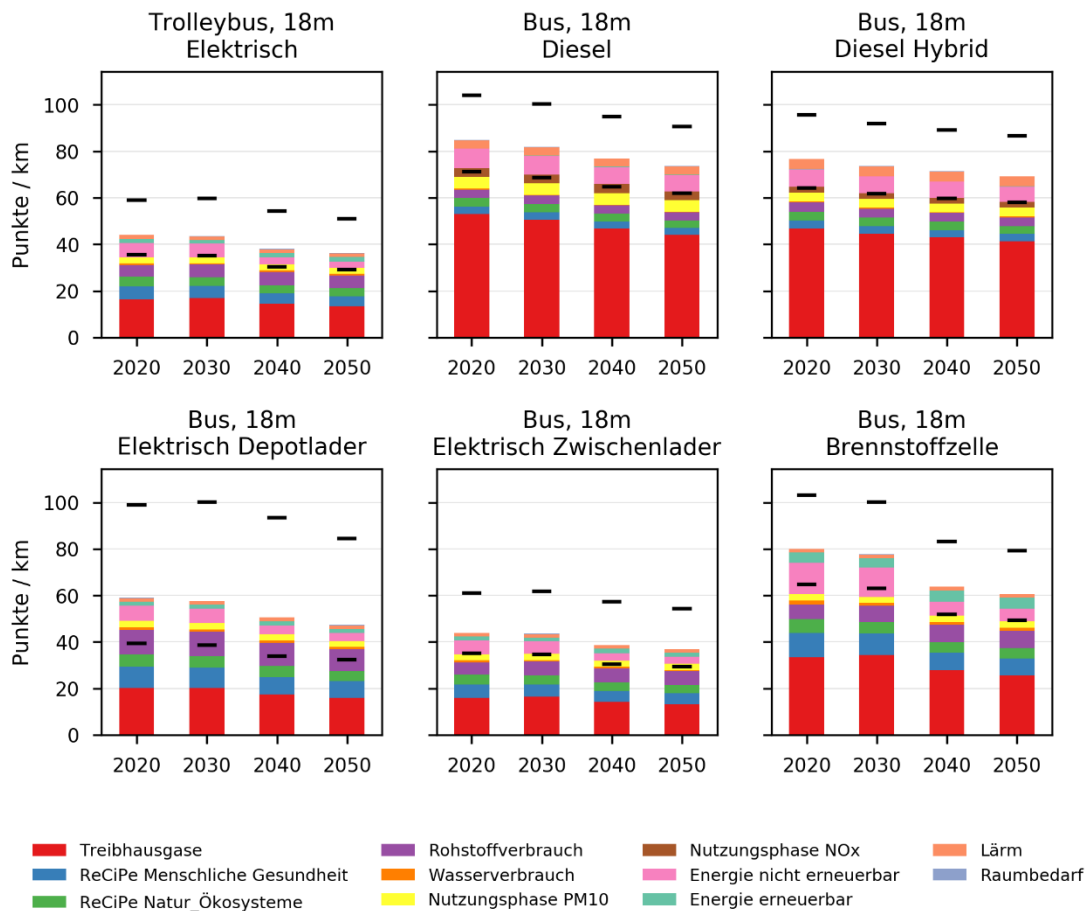
Alle Elektrobusse ausser die Brennstoffzellenbusse schneiden unabhängig vom Strommix in dieser Bewertung deutlich besser ab als Busse mit Verbrennungsmotoren. Wenn der Wasserstoff mit dem VBZ-Strommix hergestellt wird, schneiden auch die Brennstoffzellenbusse besser ab als Busse mit Verbrennungsmotoren. Wenn der Wasserstoff aber mit dem Schweizer Durchschnittstrom hergestellt wird, liegen die Brennstoffzellenbusse mit den Bussen mit Verbrennungsmotoren gleich auf.

Abbildung 22 Zürich Mobilitäts-Umweltindex (globale Perspektive) (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit VBZ-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

Abbildung 23 Zürich Mobilitäts-Umweltindex (globale Perspektive) (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit CH-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

3.4. Unsicherheiten

Die Streuungsbereiche sind in vielen der obigen Grafiken sehr gross. Die hier gezeigten Best-Case und WorstCase Ergebnisse werden mit den schlimmstmöglichen Annahmen für jeden unsicheren Parameter berechnet und sind damit sehr unwahrscheinlich. Zum Beispiel: die Chancen, dass ein Batteriebus gleichzeitig:

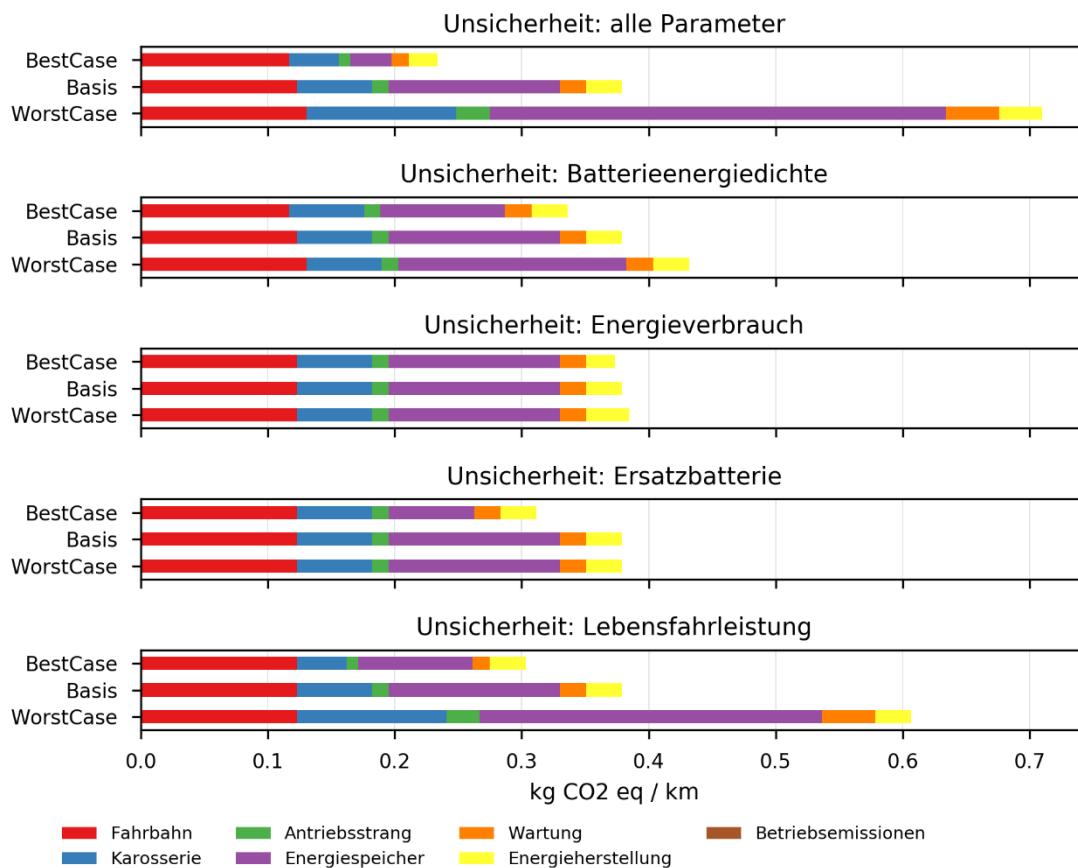
- eine schwere Batterie hat,
- einen 20% höheren Energieverbrauch hat,
- eine Ersatzbatterie braucht,
- und nur 455 000 km Lebensfahrleistung erreicht,

sind recht klein. Aber genau solche Fälle werden mit den Streuungsbereichen in den Grafiken abgebildet.

Die Auswirkungen der unsicheren Parameter können aber auch einzeln analysiert werden. Abbildung 24 zeigt eine solche Analyse für 2020 gebaute Depotlader. Hier sehen wir, dass der grösste Teil der Unsicherheiten von Spannbreiten bei der Lebensfahrleistung kommt und die Kombination von mehreren WorstCase Annahmen deutlich höhere Emissionen ergibt. Diese Trends sind auch für die anderen Wirkungsabschätzungsmethoden vorhanden.

Die Lebensfahrleistung im BestCase ist 50% höher als im Basis-Szenario, im WorstCase 50% geringer⁸. Sowohl im Basis-Szenario als auch im WorstCase wird angenommen, dass die Batterie einmal ersetzt werden muss. Im BestCase wird von keiner Ersatzbatterie ausgegangen. In den Anhängen 1-3 sind die getroffenen Annahmen zu den BestCase – Basis – WorstCase zusammengestellt.

Abbildung 24 Unsicherheitsanalyse 2020 für Depotlader (Herstellung Strom und Wasserstoff für Betriebsphase mit VBZ-Strommix gerechnet)



Grafik INFRAS, PSI, Quantis.

⁸ Im ZVV werden in der Regel Unsicherheitsbereiche in dieser Grössenordnung bei der Lebensfahrleistungen nicht festgestellt.

3.5. Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Busgrößen

Die relativen Ergebnisse für 18m-Busse lassen sich gut auf die anderen Gefässgrößen (insbesondere Standardbusse (12m)) übertragen, solange die Jahresfahrleistungen für alle Gefässgrößen ähnlich sind. Insbesondere bei kleinen Bussen (z.B. Sprinter), kann aber die Lebensfahrleistung deutlich geringer sein als die im Basisfall angenommenen 910'000 km. Da bei Elektrobusen die Herstellung der Fahrzeuge für die Umweltbelastung wichtiger ist als bei Bussen mit Verbrennungsmotor, die Nutzung der Fahrzeuge aber weniger wichtig, bedeutet eine geringere Fahrleistung, dass die Vorteile der Elektrofahrzeuge kleiner werden.

Glossar

Begriff	Erklärung
Balance of Plant (BOP)	Balance of Plant (BOP) beinhaltet alles, was benötigt wird, um einen Brennstoffzellen-Stack oder Li-Batteriezellen am Laufen zu halten.
DALY	disability adjusted life years. DALY sind eine Masszahl für die Sterblichkeit und die Beeinträchtigung des normalen beschwerdefreien Lebens durch eine Krankheit.
Endenergieverbrauch	Bezeichnet den Energieverbrauch des Fahrzeuges während der Nutzungsphase
Klima	Energieszenario: soll die Stromversorgung innerhalb einer vollständig dekarbonisierten Gesellschaft im Jahr 2050 abbilden.
LCA	Lebenszyklus Analyse (Life Cycle Assessment)
Li-Ionen Batterietechnologie LFP	Grafit-Lithium-Eisen-Phosphat
Li-Ionen Batterietechnologie NCA	Grafit/Nickel-Kobalt-Aluminium
Li-Ionen Batterietechnologie NMC	Grafit/Nickel-Mangan-Kobalt ($N_{1/3}M_{1/3}C_{1/3}$)
Primärenergieverbrauch	Bezeichnet den Primärenergiegehalt aller eingesetzten Energieträger über den ganzen Lebenszyklus
PtG	Power-to-Gas
PtL	Power-to-Liquid
ReCiPe	ReCiPe steht für «recipe to calculate life cycle impact category indicators» und ist ein «Rezept» zur Berechnung von Indikatoren für Lebenszyklus-Analyse. Die Methode ist in den Niederlanden entwickelt worden und bildet einen weltweiten Standard.
UBP	Umweltbelastungspunkte nach der Methode der ökologischen Knappheit
WWB	Energieszenario: kann auch als ein «business as usual» oder «Weiter Wie Bisher» (WWB) bezeichnet werden und beinhaltet einen (geringen) Anteil an fossiler Stromproduktion

Literatur

- Althaus, H. J., & Gauch, M. (2010). Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität: Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio-und fossilen Treibstoffen. *Technologie und Gesellschaft, Empa, Dübendorf*.
- Cox, B., Bauer, C., Beltran, A. M., van Vuuren, D. P., & Mutel, C. L. (2020). Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. *Applied Energy*, 269, 115021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192030533X>
- Cox, B., Mutel, C.L., Bauer, B., Mendoza Beltran, A., and van Vuuren, D.P. (2018). Uncertain environmental footprint of current and future battery electric vehicles. *Environmental Science and Technology*, 52 (8), p. 4989–4995.
- ecoinvent 3.6. Systemmodell «allocation, cut-off by classification», www.ecoinvent.org.
- Fazio, S., et al. (2018). "Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods." *New Models and Differences with ILCD, EUR 28888*.
- Frischknecht, R., and Sybille Büsser Knöpfel (2013). Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit: Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. *BAFU*, 2013.
- Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, Schyver A De, Struijs J, Zelm R van. (2013). ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. 1.08. The Hague, The Netherlands.
- HBEFA 4.1 (2019). Handbook of Emission Factors for Road Transport. <http://www.hbefa.net>.
- INFRAS, PSI & Quantis (2020). Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext. https://www.stadt-zuerich.ch/content/dam/stzh/gud/Deutsch/UGZ/gesundheitschutz/schadstoffe_laerm_strahlen/luft/dokumente/bericht_umweltauswirkungen_fahrzeuge.pdf.
- INFRAS (2019). E-Bus-Strategie Verkehrsverbund Luzern. https://www.vvl.ch/files/7915/5957/2552/20190404_Bericht_E-Bus-Strategie-VVL_final.pdf.
- INFRAS (2020). E-Bus-Strategie Verkehrsbetriebe St. Gallen.
- Stocker T., Qin D., Plattner G., Tignor M., Allen S., Boschung J., et al. (2013). IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.

Anhang 1. Annahmen zu 18m Bussen: Allgemein

Fahrzeugtyp	Antriebsart	Jahr	Unsicherheit	Lebensfahrleis- tung (km)	Fahrzeug Leermasse (kg)	Energieverbrauch (kWh/km)	Batterie Energiespeicher (kWh)	Elektrische Reich- weite (km)
Trolleybus	Elektrisch	2020	Basis	1105000	18183	2.84	100	28
Trolleybus	Elektrisch	2020	BestCase	1657500	17956	2.27	80	28
Trolleybus	Elektrisch	2020	WorstCase	552500	18461	3.40	120	28
Trolleybus	Elektrisch	2050	Basis	1105000	16077	2.45	250	82
Trolleybus	Elektrisch	2050	BestCase	1657500	15837	1.96	200	82
Trolleybus	Elektrisch	2050	WorstCase	552500	16541	2.94	300	82
Bus	Diesel	2020	Basis	910000	18263	4.82	0	
Bus	Diesel	2020	BestCase	1365000	18263	3.86	0	
Bus	Diesel	2020	WorstCase	455000	18263	5.79	0	
Bus	Diesel	2050	Basis	910000	16114	3.89	0	
Bus	Diesel	2050	BestCase	1365000	16114	3.11	0	
Bus	Diesel	2050	WorstCase	455000	16114	4.67	0	
Bus	Diesel Hybrid	2020	Basis	910000	18547	4.16	10	
Bus	Diesel Hybrid	2020	BestCase	1365000	18524	3.33	8	
Bus	Diesel Hybrid	2020	WorstCase	455000	18575	4.99	12	
Bus	Diesel Hybrid	2050	Basis	910000	16330	3.59	10	
Bus	Diesel Hybrid	2050	BestCase	1365000	16321	2.87	8	
Bus	Diesel Hybrid	2050	WorstCase	455000	16349	4.31	12	
Bus	Elektrisch Depotlader	2020	Basis	910000	22300	2.52	600	191
Bus	Elektrisch Depotlader	2020	BestCase	1365000	20936	2.01	480	191
Bus	Elektrisch Depotlader	2020	WorstCase	455000	23967	3.02	720	191
Bus	Elektrisch Depotlader	2050	Basis	910000	18937	2.17	1100	405
Bus	Elektrisch Depotlader	2050	BestCase	1365000	17884	1.74	880	405
Bus	Elektrisch Depotlader	2050	WorstCase	455000	20979	2.60	1320	405
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2020	Basis	910000	18233	2.52	100	32
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2020	BestCase	1365000	18006	2.01	80	32
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2020	WorstCase	455000	18511	3.02	120	32
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2050	Basis	910000	16122	2.17	250	92
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2050	BestCase	1365000	15883	1.74	200	92
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2050	WorstCase	455000	16586	2.60	300	92
Bus	Brennstoffzelle	2020	Basis	910000	19450	3.89	10	
Bus	Brennstoffzelle	2020	BestCase	1365000	19427	3.11	8	
Bus	Brennstoffzelle	2020	WorstCase	455000	19478	4.67	12	
Bus	Brennstoffzelle	2050	Basis	910000	16796	3.35	10	
Bus	Brennstoffzelle	2050	BestCase	1365000	16787	2.68	8	
Bus	Brennstoffzelle	2050	WorstCase	455000	16815	4.01	12	

Anhang 2. Annahmen zu 18m Bussen: Massen (kg)

Fahrzeugtyp	Antriebsart	Jahr	Unsicherheit allgemein	Total	Karosserie	Antriebsstrang		Brennstoffzelle		Batterie			
						mechanische Teile	elektrische Teile	elektrische Teile	mechanische Teile	Stack	Zellen	BoP	Tank
Trolleybus	Elektrisch	2020	Basis	18183	16400	500	450	0	0	0	500	333	0
Trolleybus	Elektrisch	2020	BestCase	17956	16400	500	450	0	0	0	364	242	0
Trolleybus	Elektrisch	2020	WorstCase	18461	16400	500	450	0	0	0	667	444	0
Trolleybus	Elektrisch	2050	Basis	16077	14355	456	411	0	0	0	556	299	0
Trolleybus	Elektrisch	2050	BestCase	15837	14355	456	411	0	0	0	400	215	0
Trolleybus	Elektrisch	2050	WorstCase	16541	14355	456	411	0	0	0	857	462	0
Bus	Diesel	2020	Basis	18263	16400	1200	0	0	0	0	0	0	313
Bus	Diesel	2020	BestCase	18263	16400	1200	0	0	0	0	0	0	313
Bus	Diesel	2020	WorstCase	18263	16400	1200	0	0	0	0	0	0	313
Bus	Diesel	2050	Basis	16114	14355	1095	0	0	0	0	0	0	313
Bus	Diesel	2050	BestCase	16114	14355	1095	0	0	0	0	0	0	313
Bus	Diesel	2050	WorstCase	16114	14355	1095	0	0	0	0	0	0	313
Bus	Diesel Hybrid	2020	Basis	18547	16400	1000	400	0	0	0	50	33	313
Bus	Diesel Hybrid	2020	BestCase	18524	16400	1000	400	0	0	0	36	24	313
Bus	Diesel Hybrid	2020	WorstCase	18575	16400	1000	400	0	0	0	67	44	313
Bus	Diesel Hybrid	2050	Basis	16330	14355	913	365	0	0	0	22	12	313
Bus	Diesel Hybrid	2050	BestCase	16321	14355	913	365	0	0	0	16	9	313
Bus	Diesel Hybrid	2050	WorstCase	16349	14355	913	365	0	0	0	34	18	313
Bus	Elektrisch Depotlader	2020	Basis	22300	16400	500	400	0	0	0	3000	2000	0
Bus	Elektrisch Depotlader	2020	BestCase	20936	16400	500	400	0	0	0	2182	1455	0
Bus	Elektrisch Depotlader	2020	WorstCase	23967	16400	500	400	0	0	0	4000	2667	0
Bus	Elektrisch Depotlader	2050	Basis	18937	14355	456	365	0	0	0	2444	1316	0
Bus	Elektrisch Depotlader	2050	BestCase	17884	14355	456	365	0	0	0	1760	948	0
Bus	Elektrisch Depotlader	2050	WorstCase	20979	14355	456	365	0	0	0	3771	2031	0
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2020	Basis	18233	16400	500	500	0	0	0	500	333	0
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2020	BestCase	18006	16400	500	500	0	0	0	364	242	0
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2020	WorstCase	18511	16400	500	500	0	0	0	667	444	0
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2050	Basis	16122	14355	456	456	0	0	0	556	299	0
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2050	BestCase	15883	14355	456	456	0	0	0	400	215	0
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2050	WorstCase	16586	14355	456	456	0	0	0	857	462	0
Bus	Brennstoffzelle	2020	Basis	19450	16400	500	400	90	338	204	50	33	1365
Bus	Brennstoffzelle	2020	BestCase	19427	16400	500	400	90	338	204	36	24	1365
Bus	Brennstoffzelle	2020	WorstCase	19478	16400	500	400	90	338	204	67	44	1365
Bus	Brennstoffzelle	2050	Basis	16796	14355	456	365	68	236	184	22	12	1028
Bus	Brennstoffzelle	2050	BestCase	16787	14355	456	365	68	236	184	16	9	1028
Bus	Brennstoffzelle	2050	WorstCase	16815	14355	456	365	68	236	184	34	18	1028

Anhang 3. Annahmen zu 18m Bussen: Unsicherheitsangaben

Fahrzeugtyp	Antriebsart	Jahr	Unsicherheit	Lebensfahrleistung (km)	Energieverbrauch (kWh/km)	Batterie Energiespeicher (kWh)	Batterie-masse (kg)	Anzahl Ersatzbatterie/ Brennstoffzellen
Trolleybus	Elektrisch	2020	Basis	1105000	2.84	100	833	1
Trolleybus	Elektrisch	2020	BestCase	1657500	2.27	80	606	0
Trolleybus	Elektrisch	2020	WorstCase	552500	3.40	120	1111	1
Trolleybus	Elektrisch	2050	Basis	1105000	2.45	250	855	1
Trolleybus	Elektrisch	2050	BestCase	1657500	1.96	200	615	0
Trolleybus	Elektrisch	2050	WorstCase	552500	2.94	300	1319	1
Bus	Diesel	2020	Basis	910000	4.82	0	0	0
Bus	Diesel	2020	BestCase	1365000	3.86	0	0	0
Bus	Diesel	2020	WorstCase	455000	5.79	0	0	0
Bus	Diesel	2050	Basis	910000	3.89	0	0	0
Bus	Diesel	2050	BestCase	1365000	3.11	0	0	0
Bus	Diesel	2050	WorstCase	455000	4.67	0	0	0
Bus	Diesel Hybrid	2020	Basis	910000	4.16	10	83	1
Bus	Diesel Hybrid	2020	BestCase	1365000	3.33	8	61	0
Bus	Diesel Hybrid	2020	WorstCase	455000	4.99	12	111	1
Bus	Diesel Hybrid	2050	Basis	910000	3.59	10	34	1
Bus	Diesel Hybrid	2050	BestCase	1365000	2.87	8	25	0
Bus	Diesel Hybrid	2050	WorstCase	455000	4.31	12	53	1
Bus	Elektrisch Depotlader	2020	Basis	910000	2.52	600	5000	1
Bus	Elektrisch Depotlader	2020	BestCase	1365000	2.01	480	3636	0
Bus	Elektrisch Depotlader	2020	WorstCase	455000	3.02	720	6667	1
Bus	Elektrisch Depotlader	2050	Basis	910000	2.17	1100	3761	1
Bus	Elektrisch Depotlader	2050	BestCase	1365000	1.74	880	2708	0
Bus	Elektrisch Depotlader	2050	WorstCase	455000	2.60	1320	5802	1
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2020	Basis	910000	2.52	100	833	1
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2020	BestCase	1365000	2.01	80	606	0
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2020	WorstCase	455000	3.02	120	1111	1
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2050	Basis	910000	2.17	250	855	1
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2050	BestCase	1365000	1.74	200	615	0
Bus	Elektrisch Zwischenlader	2050	WorstCase	455000	2.60	300	1319	1
Bus	Brennstoffzelle	2020	Basis	910000	3.89	10	83	1
Bus	Brennstoffzelle	2020	BestCase	1365000	3.11	8	61	0
Bus	Brennstoffzelle	2020	WorstCase	455000	4.67	12	111	1
Bus	Brennstoffzelle	2050	Basis	910000	3.35	10	34	1
Bus	Brennstoffzelle	2050	BestCase	1365000	2.68	8	25	0
Bus	Brennstoffzelle	2050	WorstCase	455000	4.01	12	53	1