



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

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

Umwelt- und Kostenbilanz von Bussen mit H₂-Verbrennungsantrieb im Vergleich zu Batterie- und Brennstoffzellenbussen

Schlussbericht

Roberto Bianchetti, INFRAS

Binzstrasse 23, 8045 Zürich, roberto.bianchetti@infrass.ch, www.infrass.ch

Dr. Brian Cox, INFRAS

Sennweg 2, 3012 Bern, brian.cox@infrass.ch, www.infrass.ch

Julien McTighe, INFRAS

Binzstrasse 23, 8045 Zürich, julien.mctighe@infrass.ch, www.infrass.ch

Dr. Ursina Walther, INFRAS

Binzstrasse 23, 8045 Zürich, ursina.walther@infrass.ch, www.infrass.ch

Dr. Hans-Jörg Althaus, EcoExistence Althaus

Im Städtli 36, 8872 Weesen, hans-joerg.althaus@ecoexistence.ch, www.ecoexistence.ch

Begleitgruppe

Stany Rochat, BAV
Dr. Stephan Husen, BAV
Christoph Schreyer, BFE
Dr. Pierryves Padey, BAFU
Nils Monney, HEIA-FR
Prof. Christian Nellen, HEIA-FR

Impressum

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

Programmleiter
Stany Rochat, BAV

Projektnummer: P-272
Bezugsquelle
Kostenlos zu beziehen über das Internet
www.bav.admin.ch/energie2050

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

Bern, den 04.12.2025

Inhalt

Zusammenfassung	6
Résumé exécutif	8
Executive Summary	10
1. Einleitung	12
1.1. Motivation und Ziel	12
1.2. Struktur des Berichts	13
2. H₂-Verbrennungsmotoren: Forschungsstand und Markt	14
2.1. Vorgehen	14
2.2. H ₂ -Verbrennungsantrieb	14
2.2.1. Treiber für H ₂ -ICE	14
2.2.2. Konzepte für Wasserstoffverbrennungsmotoren	15
2.3. Emissionen	18
2.4. Bisherige und laufende Forschungsprojekte	20
2.5. Demonstrationsfahrzeuge in der Übersicht	21
3. Systemdefinitionen / Ziel und Untersuchungsrahmen	24
3.1. Ziel der Studie	24
3.2. Untersuchungsrahmen	25
3.2.1. Funktionelle Einheiten und Referenzfluss	26
3.2.2. Einsatzprofile	27
3.2.3. Systembeschreibung und -grenze	31
3.2.4. Wirkungsabschätzungsmethoden (LCIA-Methoden)	32
3.2.5. Qualitätsanforderungen für Daten	33
3.2.6. Kritische Prüfung	34
3.2.7. Limitationen der Ökobilanz	34
3.3. Inventardaten (LCI)	34
3.4. Vorgehen und Methodik Gesamtkosten	42
3.5. Zusätzliche Annahmen für die Kostenrechnung	43

4.	Berechnung der Umweltauswirkungen (LCA-Ergebnisse)	48
4.1.	Standardbus in Orts-/Agglomerationslinie mit HVZ-Verdichtung	48
4.1.1.	Treibhausgasemissionen	48
4.1.2.	Primärenergiebedarf	49
4.1.3.	Umweltbelastungspunkte	51
4.1.4.	Direkte und kumulierte Emissionen	56
4.2.	Gelenkbus in Orts-/Agglomerationslinie, integral	58
4.2.1.	Treibhausgasemissionen	58
4.2.2.	Primärenergiebedarf	60
4.2.3.	Umweltbelastungspunkte	61
4.2.4.	Direkte und kumulierte Emissionen	61
4.3.	Gelenkbus in Mittelland-Regionallinie, integral	63
4.3.1.	Treibhausgasemissionen	63
4.3.2.	Primärenergiebedarf	65
4.3.3.	Umweltbelastungspunkte	66
4.3.4.	Direkte und kumulierte Emissionen	66
4.4.	Standardbus in Berggebiets-Regionallinie, integral	68
4.4.1.	Treibhausgasemissionen	68
4.4.2.	Primärenergiebedarf	70
4.4.3.	Umweltbelastungspunkte	71
4.4.4.	Direkte und kumulierte Emissionen	71
4.5.	Gelenkbus in Bahnersatz	73
4.5.1.	Treibhausgasemissionen	73
4.5.2.	Primärenergiebedarf	74
4.5.3.	Umweltbelastungspunkte	75
4.5.4.	Direkte und kumulierte Emissionen	76
4.6.	Sensitivitätsbetrachtungen	78
4.6.1.	Strom / Wasserstoff aus Flusswasserkraftwerk	78
4.6.2.	Zweites Leben für die Busbatterien	79
4.7.	Fazit und einsatzprofilübergreifende Diskussion	82
5.	Bestimmung der Gesamtkosten	84
5.1.	Ergebnisse der TCO-Berechnungen	84
5.1.1.	Einsatzprofil Standardbus in Orts-/Agglomerationslinie mit HVZ-Verdichtung	84
5.1.2.	Einsatzprofil Gelenkbus in Orts-/Agglomerationslinie, integral	86
5.1.3.	Einsatzprofil Gelenkbus in Mittelland-Regionallinie, integral	87

5.1.4.	Einsatzprofil Standardbus in Berggebiets-Regionallinie, integral	88
5.1.5.	Einsatzprofil Gelenkbus in Bahnersatz	89
5.2.	Sensitivitätsanalyse	90
5.2.1.	Energiepreise/Technologievergleich	90
5.2.2.	Indexierte Gesamtkosten	94
5.3.	Fazit zu den Gesamtkosten	98
6.	Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf	100
6.1.	Fazit	100
6.2.	Grenzen der Studie	101
6.3.	Forschungsbedarf	102
	Abbildungsverzeichnis	103
	Tabellenverzeichnis	106
	Glossar	107
	Literatur	109
	Annex	116
A1.	H ₂ -Verbrennungsantrieb: Begriffsdefinitionen	116
A2.	Übersicht Forschung	118
A3.	Durchgeführte Interviews	122
A4.	Energiebedarf und Emissionen in den Einsatzprofilen	123
A5.	Anpassung des Heizenergiebedarfs von Batteriebusen	131
A6.	Energieverbrauch im Vergleich	135
A7.	LCIA-Ergebnisse (Tabellen)	137
A8.	LCI: Vordergrundsystem	167
A9.	Bericht kritische Begutachtung LCA	174

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht Umweltauswirkungen und Gesamtkosten (Total Cost of Ownership, TCO) von Linien- und Bahnersatzbussen für eine Fahrzeuggeneration mit dem Modelljahr 2030. Analysiert werden Diesel-Hybridbusse als Referenz sowie die fossilfreien Alternativen Wasserstoffverbrennerbusse, Brennstoffzellenbusse und Batteriebusse.

Die Grundlage bilden modellierte Fahrprofile in städtischen, regionalen und alpinen Einsatzszenarien. Der Fokus liegt auf herausfordernden Einsatzprofilen, die sich schwerer elektrifizieren lassen und bei denen Wasserstoffverbrennerbusse eine sinnvolle Alternative darstellen könnten. Die Einsatzprofile sind geprägt durch hohe Tagesfahrleistungen, einen hohen spezifischen Energiebedarf (grosse, schwere Fahrzeuge, Strecken mit hohen Geschwindigkeiten und Höhendifferenzen) sowie fehlende Zusatzfahrzeuge, die für eine Verdichtung der Hauptverkehrszeiten erforderlich wären.

Die Analysen basieren auf Ökobilanzen (LCA) mit aktuellen Annahmen bezüglich Energiebedarf und Energiebereitstellung sowie auf TCO-Berechnungen. Die Studie stützt sich auf die Grundlagenstudie zum Postulatsbericht 19.3000 des Bundes (BFE 2020) und wurde mit dem neuesten Stand der Technik hinsichtlich Wasserstoffverbrennungsmotoren, Batterieentwicklungen, Kosten und Umweltauswirkungen von relevanten Aspekten wie der Strombereitstellung sowie der Wasserstoff- und Batterieproduktion ergänzt und aktualisiert.

Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass Wasserstoffverbrennerbusse von den fossilfreien Antrieben sowohl ökologisch als auch ökonomisch für die untersuchten Einsatzprofile am wenigsten geeignet sind. Aufgrund ihres geringen Gesamtwirkungsgrades verursachen sie die höchsten Primärenergieverbräuche, Umweltbelastungen und Kosten. Selbst bei günstigen Annahmen zur Wasserstoffproduktion (Elektrolyse mit Wasserkraft bei sehr hoher Auslastung der Infrastruktur) können sie deshalb nicht mit den untersuchten alternativen Technologien konkurrieren. Brennstoffzellenbusse sind in den untersuchten Einsatzprofilen hinsichtlich der Treibhausgasemissionen nur geringfügig schlechter als Batteriebusse, weisen jedoch einen höheren Primärenergiebedarf und zusätzliche Umweltbelastungen auf. Batteriebusse schneiden in nahezu allen untersuchten Umweltindikatoren am besten ab, auch wenn sie in bestimmten Fahrprofilen im Laufe des Tages ausgetauscht werden müssen, da die maximale Reichweite mit einer Batterieladung erreicht wird.

Die Kostenberechnungen zeigen ein ähnliches Resultat: Selbst unter der Annahme, dass die Gestehungs- und Transportkosten für grünen Wasserstoff im Jahr 2030 bei 10 CHF/kg liegen werden, ist der Wasserstoffverbrennerbus in allen betrachteten Einsatzprofilen die deutlich teuerste Option. Am zweit teuersten ist der Brennstoffzellenbus, während die Batteriebusse die günstigste Option sind. Die Sensitivitätsanalysen zeigen, dass Batteriebusse selbst bei

pessimistischen Annahmen zur Entwicklung der Batterien den anderen fossilfreien Technologien weitgehend überlegen bleiben.

Abbildung 1: Ökologischer und ökonomischer Vergleich alternativer Antriebe zu Diesel-Hybridbussen in den untersuchten Einsatzprofilen

		Diesel-Hybrid (Referenz)	Wasserstoff- verbrenner	Brennstoff- zellen	Depotlader (optimistisch)	Depotlader (pessimistisch)
Standardbus auf Orts-/Agglomerationslinie mit Hauptverkehrszeiten-Verstärkung (einfach zu elektrifizieren)	Treibhausgasemissionen	100%	40%	22%	17%	18%
	Primärenergiebedarf	100%	249%	108%	52%	53%
	Umweltbelastungspunkte	100%	85%	45%	37%	39%
	Gesamtkosten	100%	125%	120%	107%	108%
Gelenkbus auf Orts-/Agglomerationslinie mit integraler Taktstruktur	Treibhausgasemissionen	100%	42%	23%	18%	22%
	Primärenergiebedarf	100%	266%	117%	56%	61%
	Umweltbelastungspunkte	100%	90%	46%	39%	46%
	Gesamtkosten	100%	129%	119%	108%	114%
Gelenkbus auf Regionallinie im Mittelland mit integraler Taktstruktur	Treibhausgasemissionen	100%	40%	23%	17%	21%
	Primärenergiebedarf	100%	259%	126%	56%	60%
	Umweltbelastungspunkte	100%	87%	47%	38%	44%
	Gesamtkosten	100%	130%	120%	106%	112%
Standardbus auf Regionallinie im Berggebiet mit integraler Taktstruktur	Treibhausgasemissionen	100%	47%	28%	18%	19%
	Primärenergiebedarf	100%	323%	168%	65%	66%
	Umweltbelastungspunkte	100%	101%	56%	40%	43%
	Gesamtkosten	100%	135%	124%	109%	110%
Gelenkbus im Bahnersatzdienst	Treibhausgasemissionen	100%	41%	25%	19%	22%
	Primärenergiebedarf	100%	255%	129%	56%	61%
	Umweltbelastungspunkte	100%	86%	49%	40%	46%
	Gesamtkosten	100%	128%	122%	106%	112%

Erläuterung der Abbildung: Die Umweltwirkungen der Treibhausgasemissionen (GWP100), die Umweltbelastungspunkte sowie der Primärenergiebedarf werden auf Basis der in der UVEK-Datenbank (Version UVEK-DB 2024) hinterlegten Methoden und Wirkungsfaktoren berechnet. Die Gesamtkosten werden nach der Nettobarwert-Methode berechnet und basieren auf den Linienvollkosten. Als Depotlader werden Batteriebusse bezeichnet, die ausschliesslich im Depot geladen werden. Die optimistische und die pessimistische Variante berücksichtigen unterschiedliche Annahmen zur technologischen Entwicklung der Batterien. Das erste Einsatzprofil (Standardbus auf Orts-/Agglomerationslinie mit Hauptverkehrszeiten-Verstärkung) dient als Referenz und stellt eine vergleichsweise einfach zu elektrifizierende Linie dar.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass für Wasserstoffverbrennerbusse kein ökologisch und ökonomisch tragfähiges Einsatzszenario für Linien- und Bahnersatzbusse identifiziert werden konnte. Sie könnten allenfalls in spezifischen, besonders anspruchsvollen Nischenanwendungen bzw. Pilotprojekten zum Einsatz kommen, die im Rahmen der vorliegenden Studie nicht untersucht wurden. Batteriebusse stellen die vorteilhafteste Antriebstechnologie für sämtliche untersuchten Einsatzprofile dar, während Brennstoffzellenbusse eine mögliche Ergänzung darstellen, wenn der Einsatz von Batteriebussen aus betrieblichen oder technischen Gründen eingeschränkt ist.

Résumé exécutif

La présente étude analyse les impacts environnementaux et les coûts totaux (Total Cost of Ownership, TCO) des bus de ligne et de remplacement ferroviaire pour une génération de véhicules de l'année de référence 2030. Sont analysés les bus diesel-hybrides comme référence ainsi que les alternatives sans émissions fossiles : bus à moteur à combustion hydrogène, bus à pile à combustible et bus électriques à batteries.

L'analyse repose sur des profils d'exploitation modélisés dans des scénarios urbains, régionaux et alpins. L'accent est mis sur des profils d'utilisation exigeants, plus difficiles à électrifier, pour lesquels les bus à combustion hydrogène pourraient constituer une option potentielle. Ces profils se caractérisent par de fortes distances journalières, une demande énergétique spécifique élevée (véhicules lourds, trajets à grande vitesse et présentant des dénivelés importants), ainsi que par l'absence de véhicules supplémentaires permettant une densification des services aux heures de pointe.

Les analyses s'appuient sur des bilans écologiques (LCA) intégrant des hypothèses actuelles concernant les besoins énergétiques et la production d'énergie, ainsi que sur des calculs détaillés de TCO. L'étude prend pour base l'étude de référence de la Confédération liée au rapport sur le postulat 19.3000 (BFE 2020) et a été complétée et actualisée en fonction de l'état actuel de la technologie, notamment pour les moteurs à combustion hydrogène, les développements des batteries, les coûts, ainsi que les impacts environnementaux liés à la production d'électricité, d'hydrogène et de batteries.

Les résultats montrent clairement que les bus à combustion hydrogène sont, parmi les technologies sans émissions fossiles étudiées, les moins adaptés tant d'un point de vue écologique qu'économique. Leur faible rendement global entraîne les besoins en énergie primaire, les charges environnementales et les coûts les plus élevés. Même en considérant des hypothèses favorables pour la production d'hydrogène (électrolyse à partir d'énergie hydraulique avec un taux d'utilisation très élevé des infrastructures), ils ne peuvent concurrencer les technologies alternatives. Les bus à pile à combustible présentent des émissions de gaz à effet de serre seulement légèrement supérieures à celles des bus électriques à batteries, mais nécessitent davantage d'énergie primaire et génèrent des impacts environnementaux supplémentaires. Les bus électriques à batteries obtiennent les meilleurs résultats pour la quasi-totalité des indicateurs environnementaux, même si, dans certains profils d'exploitation, un remplacement du véhicule au cours de la journée est nécessaire lorsque la portée maximale d'une charge de batterie est atteinte.

Les analyses de coûts aboutissent à des conclusions similaires : même en supposant un coût de production et de transport de l'hydrogène vert de 10 CHF/kg à l'horizon 2030, le bus à

combustion hydrogène reste l'option de loin la plus coûteuse dans tous les profils étudiés. Le bus à pile à combustible constitue la deuxième option la plus onéreuse, tandis que les bus électriques à batteries demeurent les plus économiques. Les analyses de sensibilité montrent que les bus à batteries restent largement compétitifs, même sous des hypothèses pessimistes concernant l'évolution des technologies de batteries.

Figure 1: Comparaison écologique et économique des technologies alternatives par rapport aux bus diesel-hybrides dans les profils d'exploitation étudiés

		Diesel-hybride (référence)	Bus à combustion hydrogène	Bus à pile à combustible	Bus à charge en dépôt (variante optimiste)	Bus à charge en dépôt (variante pessimiste)
Bus standard sur ligne urbaine/agglomération avec renforcement aux heures de pointe (<i>facile à électrifier</i>)	Émissions de gaz à effet de serre	100%	40%	22%	17%	18%
	Besoin en énergie primaire	100%	249%	108%	52%	53%
	Unités de charge écologique	100%	85%	45%	37%	39%
	Coût du cycle de vie	100%	125%	120%	107%	108%
Bus articulé sur ligne urbaine/agglomération à cadence intégrale	Émissions de gaz à effet de serre	100%	42%	23%	18%	22%
	Besoin en énergie primaire	100%	266%	117%	56%	61%
	Unités de charge écologique	100%	90%	46%	39%	46%
	Coût du cycle de vie	100%	129%	119%	108%	114%
Bus articulé sur ligne régionale du Plateau à cadence intégrale	Émissions de gaz à effet de serre	100%	40%	23%	17%	21%
	Besoin en énergie primaire	100%	259%	126%	56%	60%
	Unités de charge écologique	100%	87%	47%	38%	44%
	Coût du cycle de vie	100%	130%	120%	106%	112%
Bus standard sur ligne régionale en zone de montagne à cadence intégrale	Émissions de gaz à effet de serre	100%	47%	28%	18%	19%
	Besoin en énergie primaire	100%	323%	168%	65%	66%
	Unités de charge écologique	100%	101%	56%	40%	43%
	Coût du cycle de vie	100%	135%	124%	109%	110%
Bus articulé en service de remplacement ferroviaire	Émissions de gaz à effet de serre	100%	41%	25%	19%	22%
	Besoin en énergie primaire	100%	255%	129%	56%	61%
	Unités de charge écologique	100%	86%	49%	40%	46%
	Coût du cycle de vie	100%	128%	122%	106%	112%

Explication de la figure: Les impacts environnementaux liés aux émissions de gaz à effet de serre (GWP100), les unités de charge écologiques ainsi que la demande en énergie primaire sont calculés sur la base des méthodes et des facteurs d'impact figurant dans la base de données du DETEC (version UVEK-DB 2024). Les coûts sont déterminés selon la méthode de la valeur actuelle nette et se basent sur les coûts complets par ligne. Les bus à charge en dépôt désignent les bus électriques à batteries qui sont rechargés au dépôt. Les variantes optimiste et pessimiste tiennent compte d'hypothèses différentes concernant l'évolution technologique des batteries. Le premier profil d'exploitation (bus standard sur ligne urbaine/agglomération avec renforcement aux heures de pointe) sert de référence et constitue une ligne relativement simple à électrifier.

En résumé, aucun scénario d'application écologiquement et économiquement viable n'a pu être identifié pour les bus à combustion hydrogène dans les services de ligne ou de remplacement ferroviaire. Ils pourraient au mieux être envisagés pour des applications de niche ou des projets pilotes très exigeantes qui n'ont pas été analysées dans le cadre de cette étude. Les bus électriques à batteries représentent la technologie la plus avantageuse pour l'ensemble des profils étudiés, tandis que les bus à pile à combustible constituent une option complémentaire possible lorsque l'utilisation de bus à batteries est limitée pour des raisons techniques ou opérationnelles.

Executive Summary

This study examines the environmental impacts and total cost of ownership (TCO) of scheduled public transit and rail-replacement buses for a vehicle generation with model year 2030. Diesel-hybrid buses are analyzed as a reference and compared with several fossil-free alternatives: hydrogen internal combustion engine buses, hydrogen fuel cell electric buses, and battery-electric buses.

As a basis for comparison, driving profiles are modeled for urban, regional, and alpine operating scenarios. The focus is on demanding applications that are more difficult to electrify, where hydrogen combustion buses may represent a suitable alternative. These applications are characterized by high daily mileage, high specific energy demand (due to large, heavy vehicles, or routes with high speeds and large elevation differences), and the absence of dedicated vehicles for increased service frequency during peak hours.

The analysis relies on life cycle assessment (LCA) and TCO calculations with current assumptions regarding energy demand and energy supply. The study builds on the baseline study for the Swiss Federal Postulate Report 19.3000 (BFE 2020). To reflect the latest technological developments, it has been supplemented with hydrogen combustion buses and updated assumptions regarding battery developments, costs, and the environmental impacts of relevant aspects including electricity generation, hydrogen production and battery production.

The results clearly show that hydrogen combustion buses are the least suitable option among the fossil-free powertrains, both environmentally and economically, for the operating profiles investigated. Due to their low overall efficiency, hydrogen combustion buses cause the highest primary energy demand and environmental burdens. Even under favorable assumptions for hydrogen production (electrolysis using hydropower with very high infrastructure utilization), they cannot compete with the alternative technologies examined. Fuel cell buses perform only slightly inferior to battery-electric buses in terms of global warming potential but show higher primary energy demand and additional environmental impacts. Battery-electric buses achieve the best performance across all environmental indicators, even though certain operating profiles may require a larger fleet size to replace buses that have reached their maximum range during the service day with fully charged buses.

The cost analysis shows a similar result: even under the assumption that the cost to produce and transport green hydrogen will reach 10 CHF/kg in 2030, hydrogen combustion buses remain the most expensive option across all operating profiles. Fuel cell buses are the second-most expensive option, while battery buses are the most cost-effective option. Sensitivity analyses indicate that battery-electric buses remain broadly superior to other fossil-free technologies even under pessimistic assumptions for battery development.

Figure 1: Environmental and economic comparison of alternative technologies to diesel-hybrid buses for the examined operating profiles

		Diesel Hybrid (Reference)	Hydrogen Combustion	Fuel Cell	Depot Charger (Optimistic)	Depot Charger (Pessimistic)
Standard bus on an urban route with peak-hour reinforcement (easy to electrify)	Global warming potential	100%	40%	22%	17%	18%
	Primary energy demand	100%	249%	108%	52%	53%
	Eco-points	100%	85%	45%	37%	39%
	Total cost of ownership	100%	125%	120%	107%	108%
Articulated bus on an urban route with integrated fixed-interval timetable	Global warming potential	100%	42%	23%	18%	22%
	Primary energy demand	100%	266%	117%	56%	61%
	Eco-points	100%	90%	46%	39%	46%
	Total cost of ownership	100%	129%	119%	108%	114%
Articulated bus on a regional route in the midlands with integrated fixed-interval timetable	Global warming potential	100%	40%	23%	17%	21%
	Primary energy demand	100%	259%	126%	56%	60%
	Eco-points	100%	87%	47%	38%	44%
	Total cost of ownership	100%	130%	120%	106%	112%
Standard bus on a regional route in a mountainous area with integrated fixed-interval timetable	Global warming potential	100%	47%	28%	18%	19%
	Primary energy demand	100%	323%	168%	65%	66%
	Eco-points	100%	101%	56%	40%	43%
	Total cost of ownership	100%	135%	124%	109%	110%
Articulated bus in rail replacement service	Global warming potential	100%	41%	25%	19%	22%
	Primary energy demand	100%	255%	129%	56%	61%
	Eco-points	100%	86%	49%	40%	46%
	Total cost of ownership	100%	128%	122%	106%	112%

Explanation of the figure: Global warming potential (GWP100), primary energy demand and Eco-points are calculated using the impact methods and impact factors provided in the UVEK database (version UVEK-DB 2024). Costs are calculated using the net present value method and are based on the total cost of ownership for the considered profile, including overhead costs. Depot Charger refers to battery-electric buses that are charged exclusively in the bus depot. The optimistic and pessimistic scenarios reflect differing assumptions for future battery technical developments. The first operating profile (Standard bus on an urban route with peak-hour reinforcement) serves as a reference and represents a route that is comparatively easy to electrify.

In conclusion, no environmentally and economically viable operating profile was identified for hydrogen combustion buses in scheduled public transit or rail-replacement service. Hydrogen combustion buses may be suitable for select, particularly demanding niche applications that were not examined in this study or for pilot projects. Battery-electric buses represent the most advantageous fossil-free technology across all operating profiles considered, while fuel cell buses may serve as a complementary solution when the deployment of battery-electric buses is limited by operational or technical constraints.

1. Einleitung

1.1. Motivation und Ziel

Die Umstellung dieselbetriebener Busflotten auf fossilfreie Antriebssysteme stellt derzeit eine zentrale Herausforderung für den öffentlichen Strassenverkehr dar. Im Bereich des städtischen Busverkehrs gilt der batterieelektrische Antrieb inzwischen als gut erforscht und vielfach als vorteilhaft gegenüber anderen Antriebstechnologien (ICCT 2023, Zimmerer et al. 2023, INFRAS 2025). Für diese Einsatzszenarien liegen zahlreiche Studien und Praxiserfahrungen vor. Weniger eindeutig ist die Bewertung bei sehr anspruchsvollen Einsatzprofilen, etwa bei längeren Umläufen, höheren topografischen Anforderungen oder besonderen betrieblichen Randbedingungen. Hier stellen sich weiterhin zentrale Fragen hinsichtlich der technischen und wirtschaftlichen Eignung unterschiedlicher Antriebstechnologien.

Im Fokus der Dekarbonisierung des öffentlichen Verkehrs stehen dabei zwei technologische Optionen: der batterieelektrische Antrieb und der Wasserstoffantrieb. Für letzteren existieren zwei technische Ansätze – der Einsatz von Brennstoffzellen in Kombination mit Elektromotoren sowie der direkte Betrieb von Verbrennungsmotoren mit Wasserstoff. Beide Technologien bieten spezifische Vor- und Nachteile. Insbesondere zur direkten Wasserstoffverbrennung gab es in jüngerer Zeit einige bemerkenswerte Ankündigungen seitens der Industrie sowie neue Publikationen und Veröffentlichungen (NOW GmbH 2021, Srna 2023a, KEYOU GmbH 2023a, Sari et al. 2024, Monney et al. 2024).

Im Rahmen des Programms Energiestrategie im öffentlichen Verkehr 2050 (ESöV 2050) wurden bereits mehrere Studien gefördert, die sich mit dem Einsatz von Wasserstoffantrieben im Busverkehr beschäftigen (BAV 2022a, BAV 2022b, BAV 2023, BAV 2024). In diesem Zusammenhang betont das Bundesamt für Verkehr (BAV) die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Bewertung der verschiedenen Antriebsoptionen. Dabei sind die Umweltauswirkungen, beispielsweise hinsichtlich Treibhausgasemissionen, Primärenergiebedarf und Umweltbelastungspunkte, sowie die Gesamtkosten, auch «Total Cost of Ownership» (TCO) genannt, sämtlicher Technologien zu berücksichtigen. Diese Faktoren sind für Transportunternehmen von entscheidender Bedeutung, um fundierte Investitions- und Beschaffungsentscheidungen treffen zu können. Derzeit bestehen jedoch noch wesentliche Wissenslücken – insbesondere hinsichtlich der Umweltbilanz und der Gesamtkosten von Bussen mit Wasserstoffverbrennungsantrieb.

Die vorliegende Studie wurde beauftragt, um genau diese Lücke zu adressieren. Ziel ist es, gezielt die Stärken und Schwächen der Technologien unter spezifischen, herausfordernden Einsatzbedingungen zu analysieren. Auf dieser Grundlage sollen belastbare Entscheidungsgrundlagen für Transportunternehmen sowie die Besteller des öffentlichen Verkehrs geschaffen werden, um den Einsatz fossilfreier Busse technologieoffen und zielgerichtet bewerten zu können.

1.2. Struktur des Berichts

Der vorliegende Bericht analysiert zunächst den Stand der Forschung und den aktuellen Markt für wasserstoffbetriebene Verbrennungsmotoren (Kapitel 2). Anschliessend werden die Systemgrenzen und der Untersuchungsrahmen der durchgeführten Analyse definiert sowie die verwendeten Inventardaten und Kostenannahmen erläutert (Kapitel 3). Kapitel 4 präsentiert die Resultate der Umweltwirkungsanalyse für sämtliche untersuchten Einsatzprofile, während Kapitel 5 die Ergebnisse der Berechnungen zu den Gesamtkosten darstellt. Abschliessend enthält Kapitel 6 Empfehlungen sowie Hinweise auf bestehenden Forschungsbedarf und rundet damit den Bericht ab.

2. H₂-Verbrennungsmotoren: Forschungsstand und Markt

2.1. Vorgehen

Im ersten Arbeitsschritt wird der aktuelle Entwicklungsstand wasserstoffbetriebener schwerer Nutzfahrzeuge (SNF) analysiert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Wasserstoffverbrennungsmotoren (H₂-ICE), da seit 2020 ein zunehmendes Interesse an dieser Technologie zu beobachten ist, jedoch bislang keine marktverfügbaren Modelle existieren.

Im Rahmen einer umfassenden Literaturrecherche wurde ein Überblick über Herstellerankündigungen sowie relevante Forschungsprojekte erstellt. Die Marktanalyse stützte sich auf Herstellerwebseiten, Pressemitteilungen, Medienberichte und branchenspezifische Newsletter. Informationen zu laufenden oder abgeschlossenen Forschungsprojekten wurden aus wissenschaftlichen Publikationen sowie von den Webseiten der Förderinstitutionen und Forschungseinrichtungen gewonnen. Ergänzt wurde das Bild durch Whitepapers sowie aufgezeichnete Workshops mit Industrie- und Forschungspartnern. Darüber hinaus wurden mittels der erwähnten Quellen zentrale Treiber und Hemmnisse für die Einführung von H₂-ICE identifiziert.

Im November 2024 wurden ergänzend Interviews mit fünf SNF-Herstellern (Renault, Scania, Volvo, DAF und Daimler) sowie mit drei Schweizer Forschungseinrichtungen (Empa, HEIA-FR, FHNW) und einem internationalen Forschungspartner (TU Graz) geführt. Im Mittelpunkt standen dabei die strategische Ausrichtung der Unternehmen, Einschätzungen zur Zukunft von H₂-ICE, der erwartete Zeithorizont bis zur Serienreife sowie die zukünftige technische Entwicklung der Antriebe. Die Gespräche mit den Forschungseinrichtungen lieferten zudem Hinweise auf bedeutende Forschungsstandorte und laufende Projekte im Bereich H₂-ICE.

Im Rahmen des Projekts wurde das E-Bus-Tool von INFRAS mit den neuesten Annahmen und Daten zur Entwicklung der Antriebstechnologien aktualisiert. Zudem wurde erstmals der H₂-Verbrennungsantrieb als Technologie aufgenommen und modelliert, um einen Vergleich mit anderen Antriebstechnologien zu ermöglichen.

2.2. H₂-Verbrennungsantrieb

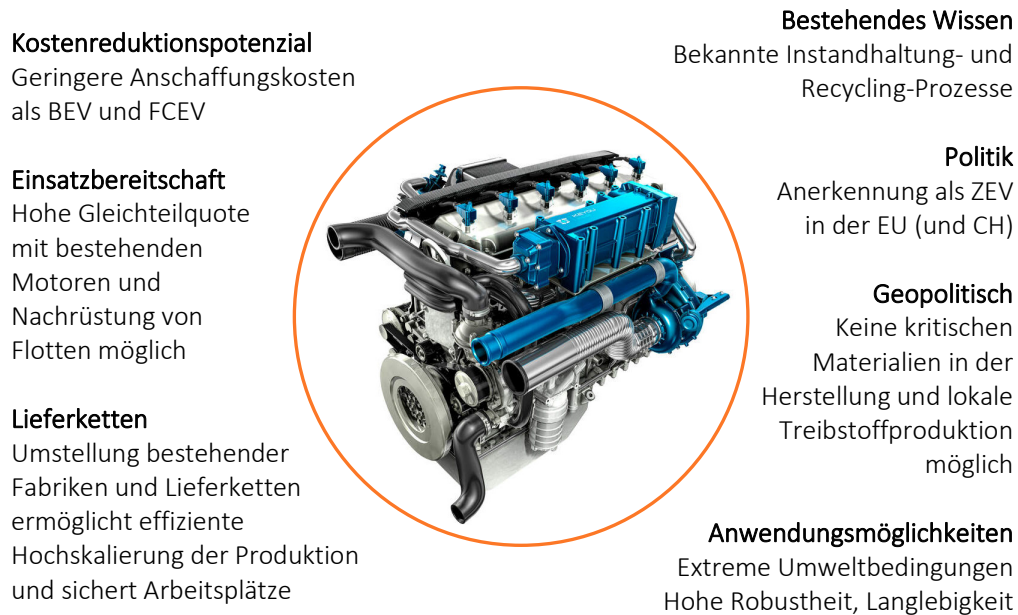
2.2.1. Treiber für H₂-ICE

Die Verschärfung bzw. die Erreichung der europäischen CO₂-Flottenzielwerte für SNF ist aus Sicht der Hersteller eine grosse Herausforderung, für die voraussichtlich verschiedene Lösungswege notwendig sind. Ab 2025 können H₂-ICE in der EU und voraussichtlich auch in der Schweiz als Zero Emission Vehicles (ZEV) zur Erfüllung der CO₂-Emissionsvorschriften angerechnet werden (Amtsblatt der Europäischen Union 2024). Dies ist ein wichtiger Faktor, da bei H₂-ICE vorhandenes Wissen genutzt werden kann und die Herstellung solcher Fahrzeuge kostengünstiger als batteriebetriebene Fahrzeuge ist. Nahezu alle Fahrzeughersteller haben ab 2022

Wasserstoffantriebe in ihr Portfolio aufgenommen und entwickeln derzeit Demonstrationsprojekte, insbesondere für Lastwagen. Zu den Vorteilen der H₂-ICE zählt eine hohe Ähnlichkeit mit Diesel- und CNG-Motoren. Die H₂-Motoren sind daher schnell einsatzbereit, mit geringeren Anschaffungskosten im Vergleich zu anderen alternativen Antrieben und mit bereits bestehenden Produktionskapazitäten und Lieferketten. Ebenso profitieren Unternehmen bei H₂-ICE von vorhandenem Wartungs- und Instandhaltungswissen. Abbildung 2 fasst die Haupttreiber für H₂-ICE zusammen, die sich aus Interviews und einer Literaturrecherche ergeben haben.

Ein wichtiger Hemmfaktor ist hingegen die begrenzte Verfügbarkeit von bezahlbarem grünem Wasserstoff für den Strassengüterverkehr. Die restlichen Hemmnisse und möglichen Nachteile dieses Antriebskonzepts werden in den nächsten Kapiteln dieses Berichts mit der Berechnung der Umweltauswirkungen und der Gesamtkosten untersucht.

Abbildung 2: Haupttreiber für H₂-ICE gemäss den Herstellern

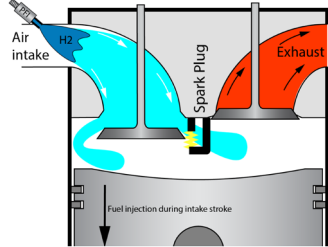
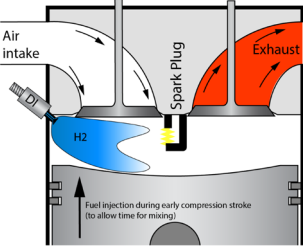
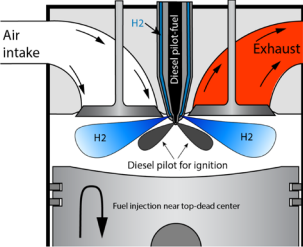


Grafik INFRAS. Quelle: INFRAS auf Basis Daimler Truck 2023b, NOW GmbH 2021, Srna 2023a und Interviews. Bild: KEYOU GmbH 2023b

2.2.2. Konzepte für Wasserstoffverbrennungsmotoren

Tabelle 1 vergleicht die am häufigsten diskutierten Konzepte für Wasserstoffverbrennungsmotoren (vgl. Annex A1 für detaillierte Begriffsdefinitionen). Laut Interviews mit Herstellern und Forschungsinstituten werden alle drei Konzepte für Anwendungen im schweren Nutzfahrzeugbereich entwickelt. H₂-ICE werden derzeit fast ausschliesslich für Lastwagen entwickelt, die Antriebe könnten aber auch in Bussen eingesetzt werden.

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Konzepte für Wasserstoffverbrennungsmotoren

	Port Fuel Injection, Spark Ignition	Low Pressure Direct Injection, Spark Ignition	High Pressure Direct Injection, Compression Ignition
Abkürzung	PFI-SI	LPDI-SI	HPDI-CI
Übersetzung	Saugrohreinspritzung, Funkenzündung	Niederdruck-Direkteinspritzung, Funkenzündung	Hochdruck-Direkteinspritzung, Kompressionszündung
Abbildung			
Einspritzdruck	3 – 10 bar	10 – 50 bar	100 – 600 bar
Serienreife	Ab 2025	Voraussichtlich 2027 – 2030	Erst nach 2030
Wirkungsgrad (BTE)	42 – 45%	43 – 45%	49 – 53%
Pro	<ul style="list-style-type: none"> minimale Änderungen gegenüber Dieselmotoren schnelle Markteinführung 	<ul style="list-style-type: none"> besserer Wirkungsgrad bessere Leistungsdichte (+20%) 	<ul style="list-style-type: none"> bester Wirkungsgrad beste Leistungsdichte
Contra	<ul style="list-style-type: none"> niedriger Wirkungsgrad niedrige Leistungsdichte Gefahr von Rückzündung Neigung zur Frühzündung hoch beansprucht Aufladesystem 	<ul style="list-style-type: none"> moderate Änderungen beanspruchte Injektoren unbrauchbarer Restdruck im Wasserstoff-Tank 	<ul style="list-style-type: none"> höhere CO₂- und NO_x-Emissionen^a moderate Änderungen hoch beanspruchte Injektoren teurer On-Board-Verdichter unbrauchbarer Restdruck im Wasserstoff-Tank
Aussage Hersteller	Wird in den meisten veröffentlichten Konzepten eingesetzt.	Steht ebenfalls bei diversen Herstellern in der Entwicklung.	Es gibt unterschiedliche Meinungen. Ein Hersteller entwickelt erste Prototypen und setzt vollständig auf HPDI CI. Ein anderer erwartet hingegen nicht, dass sich damit die CO ₂ -Emissionen von ZEV einhalten lassen.
Aussage Forschung	Einfach umsetzbar durch die Umrüstung bestehender Diesel- oder CNG-Motoren; heute bereits realisierbar.	Technisch machbar; moderate Zuversicht für LPDI SI im SNF-Einsatz.	Hohes Potenzial, aber technisch sehr herausfordernd; Einsatz in SNF-Anwendungen derzeit ungewiss.

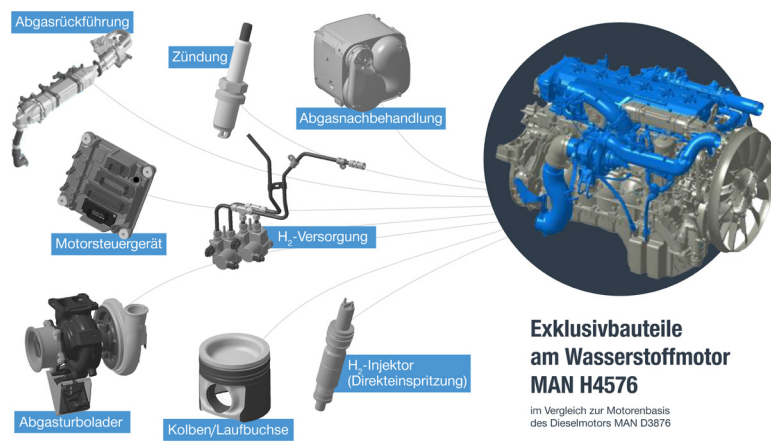
^a NO_x-Emissionen ungefähr doppelt so hoch wie bei PFI

Tabelle INFRAS. Quelle: Srna 2023a, Srna 2023b, KEYOU GmbH 2023b, AVL 2024, Kölner 2025 und Interviews

Die Konzepte basieren jeweils auf konventionellen CNG- bzw. Dieselmotoren, welche sich durch den Austausch einzelner Komponenten auf den Betrieb mit Wasserstoff umrüsten lassen. Das erste Konzept (Port Fuel Injection, Spark Ignition) wird in den meisten veröffentlichten Forschungsstudien verwendet und erfordert die geringsten Anpassungen am bestehenden Motor. Allerdings weist es die niedrigste Gesamteffizienz der drei Konzepte auf. Laut Herstellern teilen heutige Port-Fuel-Injection-Spark-Ignition-(PFI-SI)-Motoren und Low-Pressure-Direct-Injection-(LPDI-SI)-Motoren rund 80% ihrer Bauteile mit dem Basis-Dieselmotor (Kreso 2023, MAN Engines 2023). Abbildung 3 gibt einen Überblick über die angepassten Komponenten eines LPDI-SI Wasserstoffmotors im Vergleich zu einem Basis-Dieselmotor.

Sowohl PFI-SI- als auch LPDI-SI-Motoren werden mager betrieben, um Klopfen zu verhindern. PFI-SI-Motoren sind am einfachsten umzusetzen, aufgrund niedriger Einspritzdrücke und ähnlicher Erfahrungen mit CNG-Motoren. Aufgrund der Gefahr von Rückzündungen und des niedrigen Wirkungsgrads ist der PFI-SI-Motor weniger für eine lange Nutzungsdauer geeignet (Arnberger u. a. 2021). LPDI-SI-Motoren weisen bessere Wirkungsgrade und Leistungsichten auf, allerdings erhöht der Einbau von Zündkerzen und Injektoren den Entwicklungsbedarf. Die besten Wirkungsgrade sind mit HPDI-CI-Motoren zu erreichen. Fast alle Hersteller arbeiten darauf hin. Forschungsinstitute warnen jedoch, dass die Komplexität, Entwicklungs- und Anschaffungskosten dieser Konzepte aufgrund der hohen Einspritzdrücke zunehmen. Die erforderliche Lebensdauer der Injektoren ist schwer zu erreichen, und der On-Board-Verdichter ist teuer.

Abbildung 3: Anpassung eines Diesel-Motors auf Wasserstoffverbrennung (LPDI SI)



Oben rechts sind Basisbauteile des Dieselmotors grau gefärbt und angepasste Wasserstoffmotor-Bauteile blau gefärbt.

Grafik INFRAS. Quelle: MAN Engines 2023

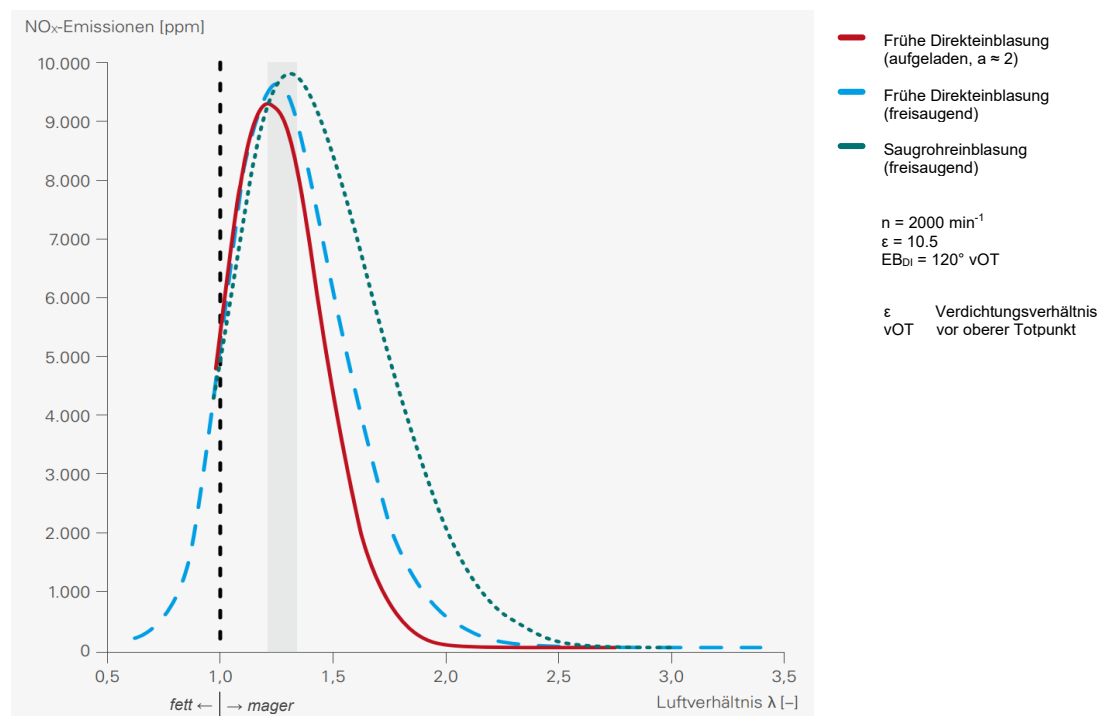
Erste moderne PFI-SI- und LPDI-SI-Prototypen wurden ab 2020 vorgestellt und ab 2022 in Prototyp-Fahrzeugen demonstriert. Hersteller kündigten PFI-SI-Vor- und Kleinserien ab 2024–2025

an, LPDI-SI-Kleinserien sind ab 2025–2027 geplant. Westport Fuel Systems stellte im Jahr 2022 zwei HPDI-CI-Prototyp-Fahrzeuge vor. In Zusammenarbeit mit Volvo, im Joint Venture Cespira, sind Demonstrationen ab 2026 und Kleinserien ab 2029 vorgesehen.

2.3. Emissionen

Alle drei Motorkonzepte verursachen Abgasemissionen durch die Verbrennung von Wasserstoff. Obwohl Wasser das Hauptprodukt der Verbrennung ist, entstehen bei hohen Temperaturen auch NO_x -Emissionen. Eine Reduzierung der NO_x -Emissionen kann durch Steuerung des Luftverhältnisses erreicht werden. Bei niedriger Last liegen die NO_x -Emissionen eines Wasserstoffmotors bei etwa 10% derer eines Dieselmotors; bei hoher Last könnten sie bis auf ein vergleichbares Niveau steigen (Vijayagopal 2023). Damit die NO_x -Emissionen unter den Grenzwerten der Abgasnormen liegen, werden bewährte Abgasrückführungstechniken oder Abgasnachbehandlungssysteme wie z.B. SCR oder LNT eingesetzt.

Abbildung 4: NO_x -Emissionen nach Luftverhältnis



Vergleich der NO_x -Emissionen von einem PFI-Motor (grün) und LPDI-Motoren mit Aufladung (rot) / ohne Aufladung (blau)

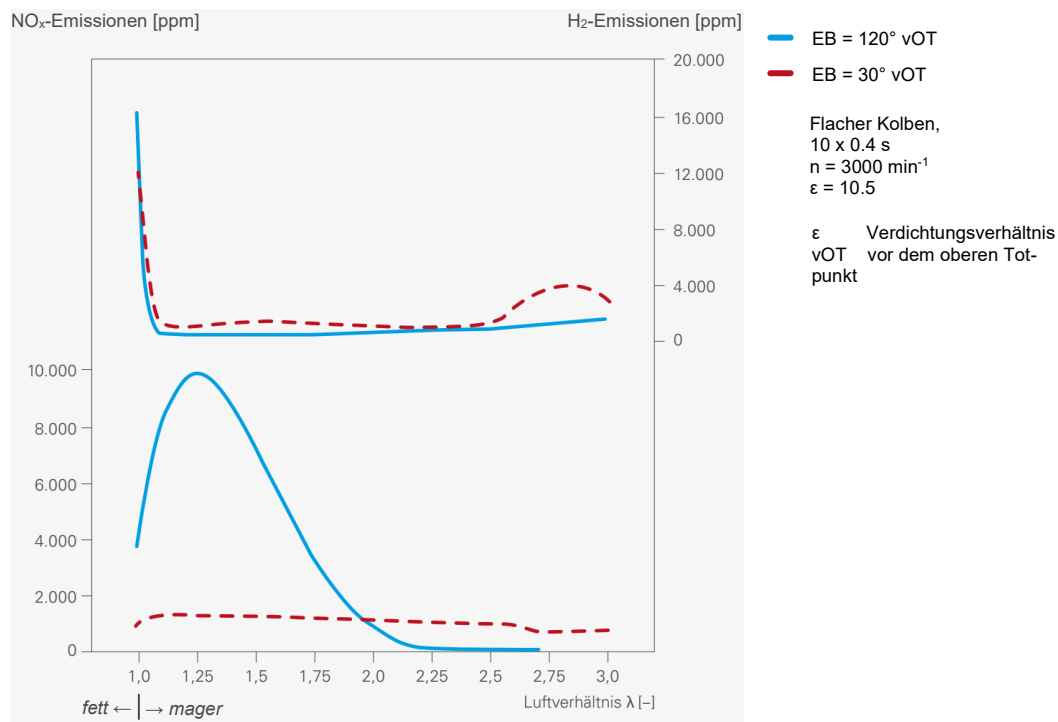
Grafik INFRAS. Quellen: AVL u. a. 2021, Grabner 2009

Abbildung 4 stellt die NO_x -Rohemissionen (ohne Nachbehandlung) der verschiedenen Motorkonzepte in Abhängigkeit vom Luftverhältnis dar. PFI- und LPDI-Motoren werden im sehr

mageren Bereich betrieben ($\lambda \gg 1$), um den Emissionen-Peak zu vermeiden. Durch den Umstieg von PFI (grün) auf LPDI (blau) und die Anwendung von Aufladung (rot) werden NO_x -Emissionen am gleichen Betriebspunkt gesenkt.

Abbildung 5 vergleicht die H_2 -Rohemissionen – sogenannter «Wasserstoff-Schlupf» – und die NO_x -Rohemissionen von LPDI- und HPDI-Konzepten in Abhängigkeit vom Luftverhältnis. Im stöchiometrischen Betrieb ($\lambda = 1$) und im sehr mageren Betrieb wird unverbrannter Wasserstoff emittiert. HPDI zeigt keinen ausgeprägten NO_x -Emissionen-Peak und ein nahezu stöchiometrischer Betrieb ist auch denkbar. Jedoch steigen die NO_x -Emissionen im Vergleich mit einem mageren betriebenen (ab $\lambda \geq 2$) LPDI-Motor.

Abbildung 5: NO_x -Emissionen und H_2 -Emissionen



Vergleich der H_2 - und NO_x -Emissionen eines LPDI-Motors (blau) und eines HPDI-Motors (rot)

Grafik INFRAS. Quellen: AVL u. a. 2021, Grabner 2009

Wasserstoff enthält keinen Kohlenstoff. Dennoch entstehen geringe Mengen an CO_2 -Emissionen durch die Verbrennung kohlenstoffhaltiger Verunreinigungen im Kraftstoff sowie durch Schmiermittelreste im Brennraum. Auch der Einsatz von Harnstoff ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$) in SCR-Systemen führt zu CO_2 -Emissionen (Srna 2023a). Für PFI-SI- und LPDI-SI-Motoren wird erwartet, dass die CO_2 -Emissionen unter 1% derjenigen von Dieselmotoren liegen und damit unter dem ZEV-Grenzwert von $1 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$ (Kreso 2023). Bei HPDI-CI-Motoren, bei denen Diesel als

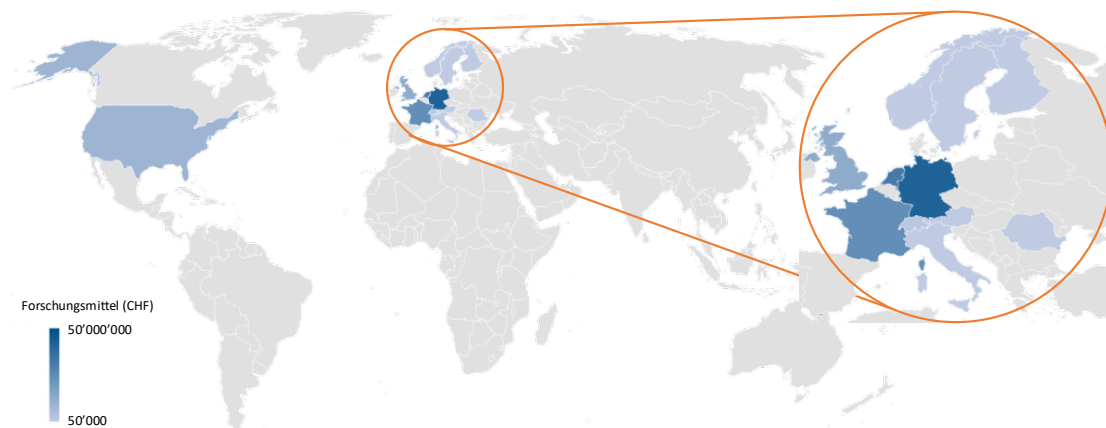
Pilotkraftstoff eingesetzt wird, ist noch offen, ob dieser Grenzwert eingehalten werden kann. Ein befragter Hersteller plant den Einsatz von HVO als Pilotkraftstoff, um die anrechenbaren CO₂-Emissionen zu senken.

Zwei weitere klimarelevante Schadstoffe im Abgas sind unverbrannter Wasserstoff¹ und Distickstoffmonoxid (N₂O), das in geringen Mengen bei der Abgasnachbehandlung entsteht. Diese sind nicht im ZEV-Grenzwert berücksichtigt und machen an einem aufgeladenen PFI-Motor zusätzlich etwa 0.2 gCO₂eq/kWh bzw. 0.25 gCO₂eq/kWh aus (Hydrogen Delivery Council 2024).

2.4. Bisherige und laufende Forschungsprojekte

Abbildung 6 zeigt die Beteiligung von Forschungseinrichtungen und Herstellern an öffentlich geförderten Forschungsprojekten zum Wasserstoffverbrennungsmotor zwischen 2020 und 2024, aufgeschlüsselt nach dem Standortland der Projektpartner sowie den Gesamtkosten. Insgesamt entfallen 92% der Fördermittel auf europäische Länder, wobei Deutschland mit einem Anteil von 34% die führende Position einnimmt. Eine Übersicht der beteiligten Förderstellen (Tabelle 14), der Forschungseinrichtungen (Tabelle 15) sowie eine Auflistung der erfassten Projekte (Tabelle 16) befindet sich im Anhang A1.

Abbildung 6: Beteiligung nach Ländern an öffentlich geförderten Forschungsprojekten



Forschungsmittel in CHF umgerechnet. Kein Anspruch auf Vollständigkeit; Fokus auf Europa.

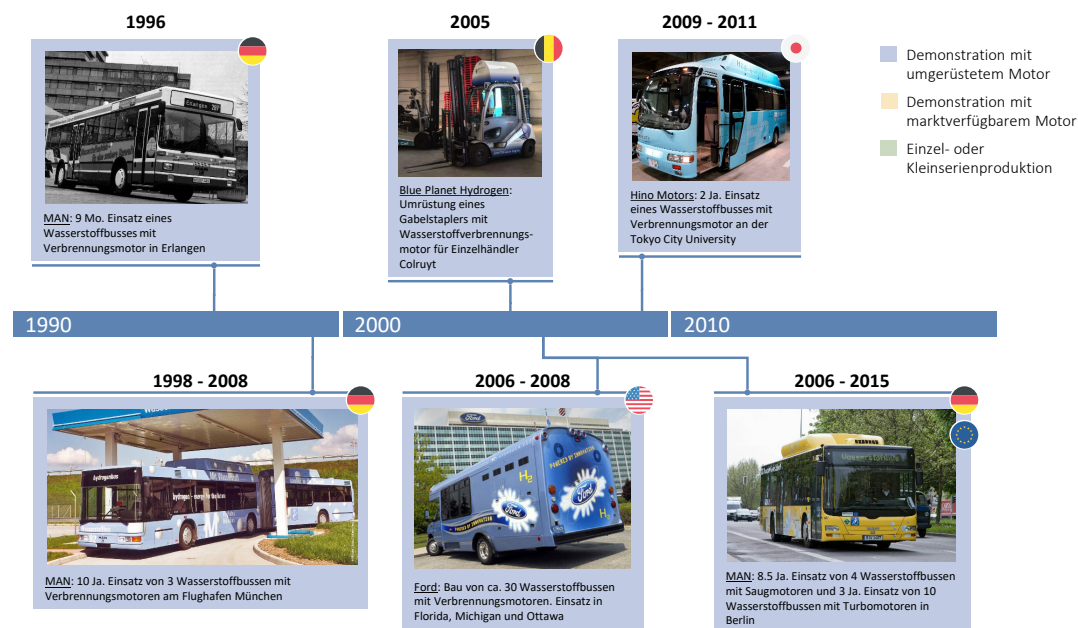
Grafik INFRAS. Quelle: Recherche INFRAS auf Basis von Forschungsdatenbanken (EU: CORDIS, IPCEI Hydrogen; CH: Aramis; DE: NOW GmbH, FVV; FR: CORAM, ADEME; US: Department of Energy), Forschungseinrichtungen (DE: RWTH Aachen; UK: Advanced Propulsion Centre), Industriepublikationen (Omnibusrevue) und Pressemitteilungen (DE: BMW Group; NL: Green Transport Delta – Hydrogen)

¹ Unverbrannter Wasserstoff kann als Reduktionsmittel in einem SCR-Katalysator eingesetzt werden. Dadurch lassen sich die NO_x- und die Wasserstoff-Emissionen deutlich reduzieren, ohne den Einsatz eines zusätzlichen Reduktionsmittels. Diese Technologie befindet sich derzeit in der Entwicklung (Christian Nellen, persönliche Mitteilung, 26. Sept. 2025; Oh et al. 2022).

2.5. Demonstrationsfahrzeuge in der Übersicht

Bereits in den 1970er-Jahren entwickelten Fahrzeughersteller gemeinsam mit Forschungsinstituten erste Wasserstoffverbrennungsmotoren für Versuchsfahrzeuge (NOW GmbH 2021). Ende der 1990er-Jahre nahm das Interesse erneut zu, und ab Mitte der 2000er-Jahre erschienen erste Vorserienmodelle von PKW und Nutzfahrzeugen auf dem Markt (Srna 2023a). In mehreren Ländern wurden Busse mit Wasserstoffverbrennungsmotoren im öffentlichen Nahverkehr eingesetzt, wie in Abbildung 7 dargestellt. Die Gründe für das wachsende Interesse lagen unter anderem in steigenden Diesel- und Benzinpreisen, der Sorge um Erdölverknappung sowie im zunehmenden Fokus auf den Klimaschutz (Gruber et al. 2002). Auch politische Zielsetzungen und das Markenimage spielten eine Rolle. Demonstrationsprojekte fanden häufig an öffentlichkeitswirksamen Orten statt – etwa an Flughäfen, Messen, während der Fussball-Weltmeisterschaft 2006 in Deutschland (Berliner Verkehrsbetriebe 2015) oder auf dem Parliament Hill in Ottawa (Office of the Minister of Natural Resources Canada 2007).

Abbildung 7: Frühes Interesse an Wasserstoffverbrenner (Teil I)



Grafik INFRAS. Quelle: NBC News 2007, Comyu 2009, Balduyck 2014, Berliner Verkehrsbetrieb 2015, Srna 2023a, MAN 2024

Ab dem Jahr 2020 ist ein erneutes Interesse an Wasserstoffverbrennungsmotoren zu beobachten. Im Rahmen öffentlich geförderter Projekte mit Beteiligung von Forschung und Industrie (siehe Tabelle 16 im Anhang) sowie durch eigenfinanzierte Initiativen der Hersteller wurden verschiedene Demonstrationsfahrzeuge entwickelt und vorgestellt. Der Schwerpunkt der Anwendungen lag vor allem auf Sattelzugmaschinen, Kommunalfahrzeugen und Baufahrzeugen.

Lediglich ein Hersteller – KEYOU – präsentierte einen Bus mit Wasserstoffverbrennungsmotor. Ab 2022 kündigten erste Hersteller Konzepte für eine Kleinserienproduktion an. Die Markteinführung von Klein- und Vorserien ist zwischen 2025 und 2030 geplant. Die Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff wird jedoch entscheidend für die Verbreitung von H₂-ICE in der Schweiz sein. Abbildung 8 fasst die bislang veröffentlichten Demonstrations- und Konzeptfahrzeuge mit Wasserstoffverbrennungsmotoren seit dem Jahr 2020 zusammen.

Exkurs: Berliner Verkehrsbetriebe (BVG)

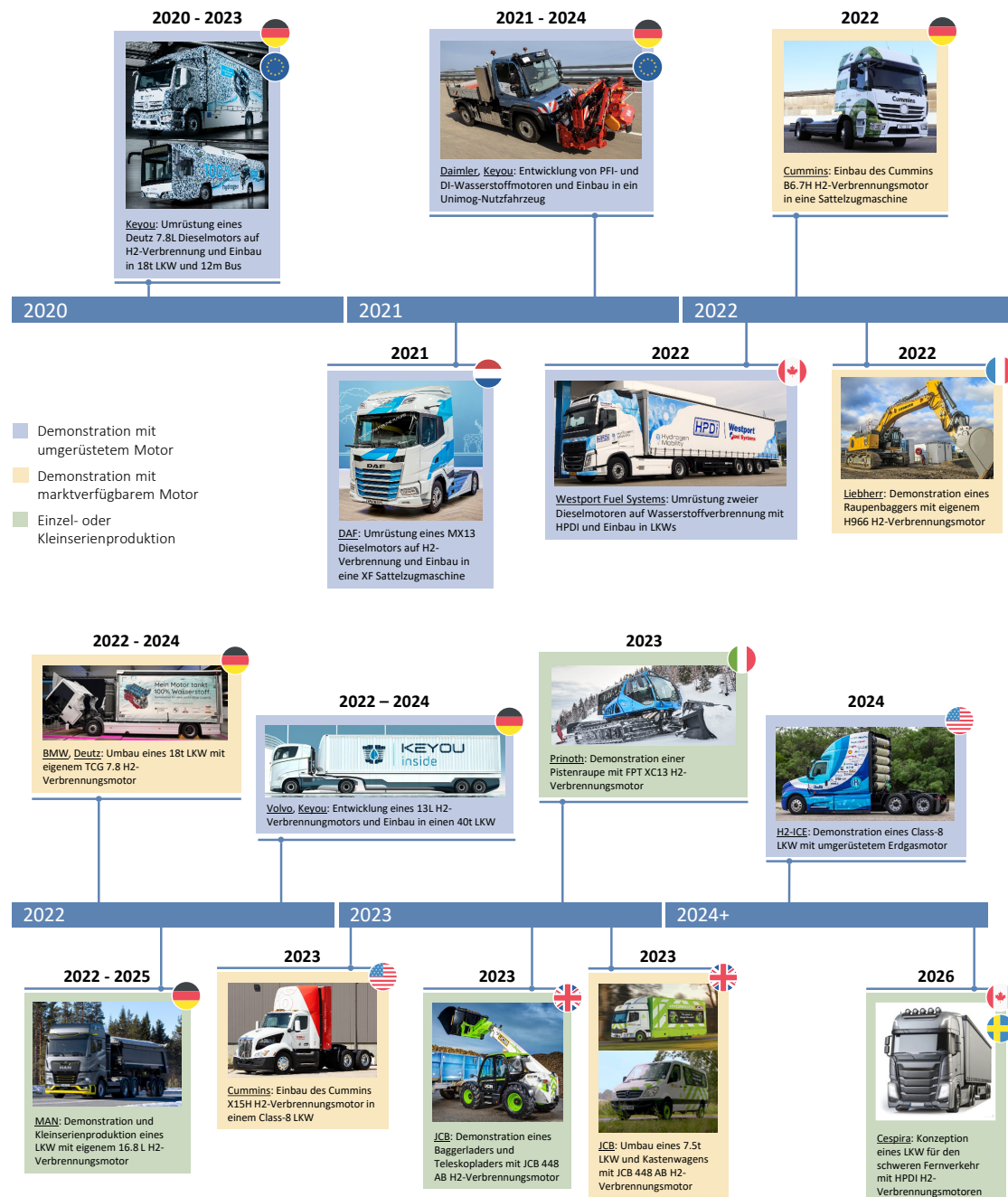
Im Rahmen des EU-Projekts HyFLEET:CUTE wurden 14 Standardbusse vom Typ MAN Lion's City mit Wasserstoff-Verbrennungsmotoren ausgestattet und ab 2006 von den BVG im Linienbetrieb eingesetzt. Vier dieser Fahrzeuge nutzten das technisch einfachere Saugmotorprinzip auf Basis bestehender Erdgasmotoren. Die übrigen zehn Busse waren mit turboaufgeladenen Wasserstoffmotoren ausgestattet, die allerdings eine geringere Zuverlässigkeit aufwiesen. Die vier Saugmotor-Busse wurden bis 2015 weiterbetrieben. Während ihres 8.5-jährigen Einsatzes zeigten die wasserstoffbetriebenen Busse eine mit Dieselnissen vergleichbare Zuverlässigkeit, mit ähnlichen Wartungs- und Reparaturkosten und einer Verfügbarkeit von 92%. Die Energiekosten lagen jedoch deutlich höher: Mit 130 €/100 km waren sie etwa dreimal so hoch wie bei den Dieselnissen der Flotte (44 €/100 km). Im Vergleich zu einem zeitgleich laufenden EU-Projekt zur Brennstoffzellentechnologie schnitten die H₂-Verbrennungsmotoren bei der Verfügbarkeit besser ab – letztere erreichten rund 80%. Der Wasserstoffverbrauch der Verbrennungsmotoren lag mit 22 kg/100 km deutlich über dem der FCEV (9 kg/100 km). Trotz ihrer Standfestigkeit und der einfachen Integration in die bestehende Flotte bewertete die BVG die Wasserstoffverbrennung lediglich als potenzielle Brückentechnologie. Bereits im Jahr 2013 wurde ein geplantes Folgeprojekt eingestellt, da sich die Förderinstitutionen zunehmend auf FCEV konzentrierten.

Wasserstoffverbrennungsmotoren (H₂-ICE) können ab 2025 in der EU und voraussichtlich auch in der Schweiz als Zero Emission Vehicles (ZEV) zur Erfüllung der CO₂-Emissionsvorschriften angerechnet werden. Nahezu alle Fahrzeughersteller haben daher Wasserstoffantriebe in ihr Portfolio aufgenommen und entwickeln derzeit Demonstrationsprojekte im LKW-Bereich. H₂-ICE bietet eine schnell umsetzbare Übergangslösung für eine wesentliche Reduzierung der CO₂-Emissionen mit möglichen Nischenanwendungen in Baufahrzeugen und im schweren internationalen Transport. Die Technologie ist eher für einen hohen Leistungsbedarf oder schwierige Umweltbedingungen geeignet (NOW GmbH 2021).

Mit Blick auf den Einsatz in Linienbussen wurden in Interviews vor allem Hemmnisse genannt. Batteriebusse gelten im Stadtverkehr als besser geeignet – insbesondere aufgrund ihrer sehr geringen Luft- und Lärmemissionen sowie ihrer hohen Effizienz durch Rekuperation im Stop-and-Go-Betrieb. Auch im Überlandverkehr gilt die Reichweite in vielen Fällen als ausreichend, sofern Linienführungen angepasst und Ladepausen sinnvoll integriert werden. Da Batteriebusse bereits in zahlreichen Busflotten im Einsatz sind, sehen die meisten Akteure derzeit keinen ausreichenden Mehrwert, um auf Wasserstoffverbrennung umzusteigen. Für

anspruchsvolle Linien oder für Reisebusse werden H₂-ICE in der Forschung diskutiert und in Pilotversuchen getestet, aber kein Hersteller plant derzeit Vor- oder Kleinserien. Nur die Umrüstung bestehender Busse wird angeboten.

Abbildung 8: Zeitleiste Demonstrations- und Konzeptfahrzeuge (Teil II)



Grafik INFRAS. Quellen: Cummins Inc. 2022, Liebherr 2022, Rathmann 2022, Daimler Truck AG 2023a, Hoffmann 2023, KEYOU GmbH 2023b, Srna 2023a, Cespira 2024, Deutz AG 2024, JCB 2024, DAF 2025, Prinoth 2025, Southwest Research Institute 2025

3. Systemdefinitionen / Ziel und Untersuchungsrahmen

In diesem Kapitel werden die zu untersuchenden Systeme für die Bestimmung der Umweltauswirkungen und der Gesamtkosten definiert. Da der Ökobilanzteil der Studie in Anlehnung an ISO 14'040/44² erstellt wird, folgen wir in der Systemdefinition den Anforderungen zur Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens dieser Normen.

3.1. Ziel der Studie

Die Studie untersucht, ob Busse mit Wasserstoffverbrennungsmotoren (H₂-ICE) im öffentlichen Personentransport aus ökonomischer und ökologischer Sicht eine sinnvolle Alternative zu batterieelektrischen Bussen (Depotlader), Brennstoffzellen- sowie modernen Dieselnissen (Hybride) darstellen können.

Vergleiche zwischen Bussen mit verschiedenen Antriebsvarianten zeigen, dass Technologievergleiche je nach Einsatzprofil sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern können. Wichtige Faktoren sind die Fahrzeuggrößen, die geforderte Tagesfahrleistung, das Streckenprofil (Geschwindigkeiten, Steigungen) und der Fahrplan – z.B. Möglichkeiten zur Zwischenladung an Endhaltestellen oder Verdichtung des Fahrplans während Hauptverkehrszeiten (HVZ-Verdichtung). Diese Faktoren sind auch für den Vergleich zwischen Wasserstoffverbrennerbussen und Batteriebusen relevant. Entsprechend sollen unterschiedliche typische Anwendungen der Busse betrachtet werden³.

Die Ergebnisse dieser Studie sollen Transportunternehmen und die Besteller des öffentlichen Verkehrs (ÖV) bei der Auswahl der Antriebstechnologie für post-fossile Busse unterstützen. Da Wasserstoffverbrennerbusse derzeit nicht erhältlich sind, zielt die Studie darauf ab, zukünftige Busbeschaffungen (ca. 2030) mit anschließender Nutzung zu unterstützen. Die Festlegung des Zeitpunkts basiert auf den Ergebnissen der Marktanalyse (vgl. Kap. 2), die zeigt, dass die ersten serienreifen, busgeeigneten H₂-Motoren ab 2030 auf dem Markt verfügbar sein könnten.

Die in dieser Studie erarbeiteten LCA-Daten sollen, soweit sinnvoll, in die LCA-Datenbank des UVEK integriert werden, um sie für weiterführende Arbeiten verfügbar zu machen. Diese vergleichende Ökobilanz untersucht diverse Antriebstechnologien in unterschiedlichen Anwendungen. Die Ergebnisse werden zwar in erster Linie für Transportunternehmen und Besteller des öffentlichen Verkehrs erstellt, stehen aber auch der breiten Öffentlichkeit zur Verfügung.

² Einige Anforderungen der Norm werden bewusst nicht erfüllt. Wo das der Fall ist, wird im folgenden Text kurz darauf hingewiesen.

³ Es ist wichtig zu beachten, dass ein direkter Vergleich der Technologien nur innerhalb der jeweiligen Anwendung sinnvoll und zulässig ist. Ein Vergleich zwischen den Anwendungen (z.B. Bergstrecke versus Stadtlinie, Standardbus versus Gelenkbus, etc.) ergibt aufgrund der unterschiedlichen funktionellen Einheiten keinen Sinn und ist nach ISO 14'040 nicht zulässig.

3.2. Untersuchungsrahmen

Die Studie vergleicht zukünftige Busse (Inbetriebsetzung in 2030) mit elektrischem Antrieb und grosser NMC-Batterie⁴ (Depotlader mit 3.25 – 4 Tonnen / 730 – 900 kWh⁵ Batterien) sowie Busse mit kleiner Batterie (500 kg / 90 kWh) und Brennstoffzelle miteinander und mit Bussen mit Wasserstoff- und Dieselerbrennungsmotoren.

Auf die Betrachtung von Gelegenheits- bzw. Kombiladern (siehe Box 1) wird verzichtet, da wir davon ausgehen, dass für Neuanschaffungen neben Depotladern praktisch nur noch Kombilader mit grosser Batterie (analog Depotlader) und zusätzlicher Nachlademöglichkeit relevant sein werden. Die Kosten und Umweltauswirkungen für dieses Konzept können sehr einfach aufgrund der Ergebnisse von Depotladern abgeschätzt werden.

Tabelle 2 listet die Antriebstechnologien auf, die in dieser Studie verglichen werden.

Tabelle 2: Antriebstechnologien im Vergleich

	Antriebstechnologie	Batterieent- wicklung	Bezeichnung
1	Diesel-Hybridbus, Euro 7 (Diesel-ICE)		Diesel-Hybrid
2	Wasserstoffverbrennerbus (H ₂ -ICE)		Wasserstoffverbrenner
3	Brennstoffzellenbus (H ₂ -FC)		Brennstoffzellen
4	Batteriebus, Depotlader (BEV-Depot)	Rasch	Depotlader (optimistisch)
5	Batteriebus, Depotlader (BEV-Depot)	Langsam	Depotlader (pessimistisch)

Jede der Antriebstechnologien wird in einem Standardbus (12m) und in einem Gelenkbus (18m) betrachtet.

Tabelle EcoExistence.

⁴ NMC steht für Nickel-Mangan-Cobalt. Die Kathoden von NMC-Batterien sind aus diesen Elementen zusammengesetzt. Es gibt auch Antriebsbatterien für E-Busse, die eine Eisenphosphat-Kathode haben (LFP-Batterien). In dieser Studie werden NMC Batterien angenommen, weil sie eine höhere Energiedichte aufweisen und die Studie auf Anwendungen schaut, die genau das verlangen.

⁵ Nutzbare Energiekapazität.

Box 1: Ladekonzepte für Elektrobusse

Bei Elektrobussen gibt es zwei grundsätzlich unterschiedliche Ladekonzepte und eine Chimäre:

Depotlader verfügen über grosse Batterien, die grundsätzlich über Nacht im Depot aufgeladen werden. Im Idealfall verfügen die Depotlader über genügend Batteriekapazität für einen ganzen Tageseinsatz. Sollte ein Einsatz zu lange werden, müssen Depotlader ausgetauscht und im Depot nachgeladen werden.

Gelegenheitslader verfügen über kleine Batterien, die typischerweise die Energie für einen bis drei Umläufe speichern können. Gelegenheitslader werden im Laufe des Einsatzes regelmässig an einer oder beiden Endhaltestellen nachgeladen. Das Nachladen erfordert typischerweise zwischen 5 und 10 Minuten Zeit. Je nach Fahrplangestaltung und Umlaufeigenschaften, können Gelegenheitslader an einer Endhaltestelle für jeweils einen Umlauf aussetzen, um genügend Zeit zum Nachladen zu haben. So wird ein zusätzliches Fahrzeug benötigt.

Kombilader sind eine Mischung der beiden Konzepten. Die Fahrzeuge haben grosse Batterien (analog Depotlader) und zusätzlich die Möglichkeit, auf der Strecke nachzuladen. Dazu verfügen sie oft über einen Pantographen. Kombilader starten ihren Umlauf mit voller Batterie. Die Zwischenladungen auf der Strecke erfolgen nur bei Bedarf und nach Möglichkeit und dienen dazu, die Tagesfahrleistung zu erhöhen, sodass auch bei langen Einsätzen kein Fahrzeugtausch nötig wird.

3.2.1. Funktionelle Einheiten und Referenzfluss

In dieser Studie werden Technologievergleiche in fünf verschiedenen Einsatzprofilen erstellt. Es kann vorkommen, dass zur Erfüllung eines Einsatzprofils mehr Batteriebusse benötigt werden als Diesel- oder Wasserstoffbusse, da die Batteriebusse im Laufe des Tages ausgetauscht und nachgeladen werden müssen. Entsprechend betrachtet diese Studie verschiedene Produktsysteme⁶ mit fünf verschiedenen funktionellen Einheiten⁷, die alle denselben Referenzfluss⁸ (pro Jahr) teilen. Die funktionellen Einheiten sind das Bereitstellen einer bestimmten Transportkapazität auf einer Linie mit einem bestimmten Einsatzprofil (Tabelle 4). Die Inventare und die Ergebnisse beziehen sich jeweils auf einen Referenzfluss von einem Jahr (pro Jahr). Ein Vergleich der Ergebnisse pro Fahrzeugkilometer wäre nicht sinnvoll, da je nach Antriebstechnologie unterschiedlich viele Fahrzeugkilometer benötigt werden, um die Einsatzprofile abzubilden. Die wichtigste Implikation davon ist, dass die Ergebnisse nur innerhalb eines Einsatzprofils vergleichbar sind. Eine Aussage, dass Technologie A in Einsatzprofil 1 besser oder schlechter abschneide als Technologie B in Einsatzprofil 2, ist nicht zulässig, und alle aus solchen Vergleichen abgeleiteten Folgerungen wären falsch⁹.

⁶ Ein Produktsystem gemäss ISO 14'040 ist die Gesamtheit aller Prozesse und Produkte, die benötigt werden, um ein Produkt oder eine Dienstleistung bereitzustellen.

⁷ Die ISO-Norm definiert eine funktionelle Einheit (FU) als Bezugsgrösse für den Nutzen eines Produktsystems. Die FU beschreibt alle relevanten Funktionen, die ein Produkt oder eine Dienstleistung erfüllt.

⁸ Der Referenzfluss ist (gemäss ISO-Norm) das Mass für die Outputs von Prozessen eines vorhandenen Produktsystems, die zur Erfüllung der Funktion, ausgedrückt durch die FU, erforderlich sind.

⁹ Wir weisen so deutlich darauf hin, weil solche Fehler leider häufig vorkommen und teilweise sogar in Berichten oder Artikeln publiziert werden.

3.2.2. Einsatzprofile

Diese Studie geht davon aus, dass batterieelektrische Busse den Wasserstoffverbrennerbussen sowohl in Bezug auf die Gesamtkosten als auch auf die Umweltauswirkungen überlegen sind, wenn das Einsatzprofil für sie einfach zu erfüllen ist. Diese Hypothese wird mit einem Einsatzprofil überprüft, in dem Dieselbusse ohne Einschränkungen durch Batteriebusse ersetzt werden können. Wasserstoffverbrennerbusse könnten jedoch bei speziellen Einsatzprofilen, für die Batteriebusse aufgrund ihrer beschränkten Reichweite im Laufe eines Tages ausgetauscht werden müssen, vergleichsweise gute Ergebnisse erzielen. Dies wird mit anspruchsvolleren Einsatzprofilen überprüft, bei denen der Einsatz von Batteriebussen zu einem erhöhten Fahrzeugbedarf führen könnte. Für diese Studie werden 4 Einsatzprofile aus BFE 2020 sowie ein Einsatz im Bahnersatz gewählt (Tabelle 3, Details Tabelle 4 und Anhang A4). Es wurden jene Profile ausgewählt, die besonders anspruchsvolle Einsätze für Elektrobusse darstellen bzw. den höchsten Fahrzeugmehrbedarf aufweisen, wenn Batteriebusse eingesetzt werden. Ergänzend wurde ein leicht zu elektrifizierendes Profil als Referenz berücksichtigt. Es ist wichtig zu beachten, dass die Einsatzprofile nicht einem durchschnittlichen Einsatz in der Schweiz entsprechen und darum die Ergebnisse nicht mit denen von anderen Studien oder Tools (z.B. Umweltrechner Verkehr¹⁰) vergleichbar sind. Das gilt sowohl für die Fahrprofile als auch für die Auslastung der Busse, die sehr unterschiedlich sein können. Im Folgenden werden die ausgewählten Einsatzprofile detailliert beschrieben.

Tabelle 3: Bussgrössen und Einsatzprofile im Vergleich

Linientyp	Abkürzung	Busgrösse	Abkürzung	Taktstruktur	Abkürzung	Bezeichnung
Orts-/Agglomerationslinie	OV	Standardbus	SB	mit HVZ-Verdichtung	HVZ-V	OV_SB_HVZ-V
		Gelenkbus	GB	integral	Int	OV_GB_Int
Regionallinie Mittelland	RV-M	Gelenkbus	GB	integral	Int	RV-M_GB_Int
Regionallinie Berggebiet	RV-B	Standardbus	SB	integral	Int	RV-B_SB_Int
Bahnersatz / EV	Bahners	Standardbus	SB	-		Bahners_SB

Für das Einsatzprofil «Bahnersatz» gehen wir davon aus, dass die Busse nicht ausschliesslich für den Bahnersatz eingesetzt werden, sondern auch als Reservefahrzeuge auf anderen Linien oder für andere ausserfahrplanmässige Einsätze. HVZ-Verdichtung: Anpassung der Taktstruktur in der Hauptverkehrszeit – die Busse fahren häufiger, um die höhere Nachfrage zu bedienen. Integrale Taktstruktur: Einheitlich abgestimmter Fahrplan mit regelmässigen, sich wiederholenden Abfahrtszeiten.

Tabelle EcoExistence.

¹⁰ September 2024 von EnergieSchweiz veröffentlicht, basierend auf den mobitool-Faktoren v3.0.

Im ersten Profil (OV_SB_HVZ-V) wird ein Standardbus im Ortsverkehr eingesetzt. Aufgrund der Fahrzeuge, die für die Hauptverkehrszeiten-Verstärkung benötigt werden, können in diesem Profil Batteriebusse im Laufe des Tages ausgetauscht werden, wenn die Reichweite sonst nicht ausreicht. Dieses Profil ist damit sehr Batteriebus-freundlich.

Die Orts-/Agglomerationslinie mit Gelenkbussen und integraler Taktstruktur (OV_GB_Int) entspricht einem Einsatz, bei dem der spezifische Energiebedarf¹¹ (kWh/km) und die Tagesfahrleistung hoch sind. In diesem Profil kann es — bei einer langsamen Verbesserung der Energiedichte von Batterien bis 2030 — sein, dass Batteriebusse im Laufe des Tages ausgetauscht werden müssen, weil die Batterien schon vor Dienstende leer sind.

Die Regionallinie im Mittelland (RV-M_GB_Int) und der Einsatz im Bahnersatz (Bahners_GB) stellen hohe Anforderungen an die Batteriebusse, weil die Tagesfahrleistungen sehr hoch sind. Im Bahnersatz gehen wir von einer Tagesdistanz von 500 km aus. Das entspricht 10 Stunden Fahrzeit bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h und dürfte in den meisten Fällen ausreichen¹². Ausserdem ist auch der spezifische Energiebedarf der Gelenkbusse hoch. Auch in diesen Profilen müssen Batteriebusse — bei einer langsamen Verbesserung der Energiedichte von Batterien bis 2030 — im Laufe des Tages ausgewechselt werden.

Die Regionallinie im Berggebiet (RV-B_SB_Int) wurde gewählt, weil die grossen Steigungen auf diesen Linien den spezifischen Energiebedarf erhöhen und erwartet wurde, dass in solchen Anwendungen die Reichweite von Batteriebussen ebenfalls ungenügend sein könnte.

Die Bestimmung der Reichweite von Batteriebussen im Jahr 2030 ist mit grossen Unsicherheiten verbunden. Daher werden alle Einsatzprofile sowohl in einem pessimistischen als auch in einem optimistischen Szenario betrachtet. Im optimistischen Szenario wird eine rasche Verbesserung der Batterietechnologie angenommen, während im pessimistischen Szenario eine langsame Verbesserung angenommen wird. Konkret gehen wir davon aus, dass im Jahr 2030 im optimistischen Fall Batterien mit einer netto-Energiedichte von 0.25 kWh/kg und im pessimistischen Fall von 0.20 kWh/kg in Bussen eingesetzt werden¹³.

Technische Informationen zu den Fahrzeugen und daraus abgeleitete betriebliche Aspekte sind in Tabelle 5, Tabelle 6, Tabelle 7, Tabelle 8, und Tabelle 9 zusammengestellt. Die Herleitung des Energieverbrauchs und der direkten Emissionen im Betrieb sind im Anhang A4 dokumentiert.

¹¹ Aufgrund der schweren Busse und der vielen Anfahr- und Bremsphasen.

¹² Allerdings sind deutlich grössere Distanzen möglich, insbesondere wenn längere Autobahnstrecken zurückgelegt werden. Solche Einsätze würden nicht nur zu einer sehr hohen Tagesfahrleistung, sondern auch zu einem sehr hohen spezifischen Energiebedarf (kWh/km) führen. Dies würde die reale Reichweite von Batteriebussen, insbesondere im Winter, deutlich unter 300 km reduzieren. Daher wären Depotlader für solche Einsätze aus betrieblicher Sicht nur noch bedingt geeignet.

¹³ Prognosen von INFRAS basieren auf historischer Entwicklung, aktuellen wissenschaftlichen Studien (z.B. Fraunhofer ISI 2023, ICCT 2023) und einem begrenzten Wachstumsmodell, modelliert in der letzten Version von INFRAS eBusTool (INFRAS 2025).

Bei den Wasserstoffverbrennerbussen gehen wir davon aus, dass es sich bei den Serienmodellen, die 2030 verfügbar sein könnten, um Motoren mit Saugrohreinspritzung und Funkenzündung (PFI-SI; vgl. Tabelle 1) handeln wird. Diese Technologie erfordert nur geringe Änderungen an Motor- und Fahrzeugkomponenten von Erdgasfahrzeugen und ist darum rasch und günstig produzierbar. Der Spitzenwirkungsgrad von solchen Pilotmotoren liegt aktuell bei 44.5% (KEYOU 2023b, Srna 2023a). In der Modellierung des Treibstoffbedarfs wird von einem Wirkungsgrad von 44% ausgegangen. Ein gut 10% höherer Wirkungsgrad (50%) wäre nur mit Hochdruck-Direkteinspritzung und Kompressionszündung zu erreichen. Dann würde allerdings als Pilotbrennstoff zusätzlich zum Wasserstoff noch Diesel benötigt.

Tabelle 4: Allgemeine Linienkennzahlen der Einsatzprofile

		OV_SB_HVZ-V	OV_GB_Int	RV-M_GB_Int	RV-B_SB_Int	Bahners_GB
Linien-Cluster		Orts-/Agglomerationslinie	Orts-/Agglomerationslinie	Regionallinie Mittelland	Regionallinie Berggebiet	Bahnersatz
Busgrösse		Standardbus	Gelenkbus	Gelenkbus	Standardbus	Gelenkbus
Taktstruktur		HVZ-Verdichtung	Integral	Integral	Integral	-
Taktintervall Mo-Fr HVZ	min	7.5	10	15	30	30
Taktintervall Mo-Fr NVZ	min	15	10	15	30	30
Taktintervall Sa/So	min	15	10/20	15/30	30	30
Betriebszeit	h	06 - 20	06 - 24	06 - 24	06-20	06 - 24
Linienlänge	km	6	12	10	25	30
Fahrzeit pro Richtung	min	18	35	25	55	35
Ø Fahrgeschwindigkeit	km/h	22	22	32	32	50
Umlaufzeit	min	45	80	60	120	150
Aufenthaltszeit Endhaltestelle A	min	4.5	5	5	5	5
Aufenthaltszeit Endhaltestelle B	min	4.5	5	5	5	5
Anz. Fahrzeuge Grundangebot	#	3	8	4	4	5
Anz. Fahrzeuge HVZ-Verdichtung	#	3				
Tageseinsatz-Weite pro Fahrzeug Grundkurse	km/d	300	280 - 350	300 - 400	300	500
Tageseinsatz-Weite pro Fahrzeug HVZ-Kurse	km/d	50 + 50	-	-	-	-
Jahres-Kilometerleistung (ohne zusätzliche Depotein- und ausfahrten)	km/a	400000	700000	450000	450000	450000
Transportkapazität pro Bus	Personen	70	100	100	70	100

Für das Einsatzprofil «Bahnersatz» gehen wir davon aus, dass die Busse nicht ausschliesslich für den Bahnersatz eingesetzt werden, sondern auch als Reservefahrzeuge auf anderen Linien oder für andere ausserfahrplanmässige Einsätze.

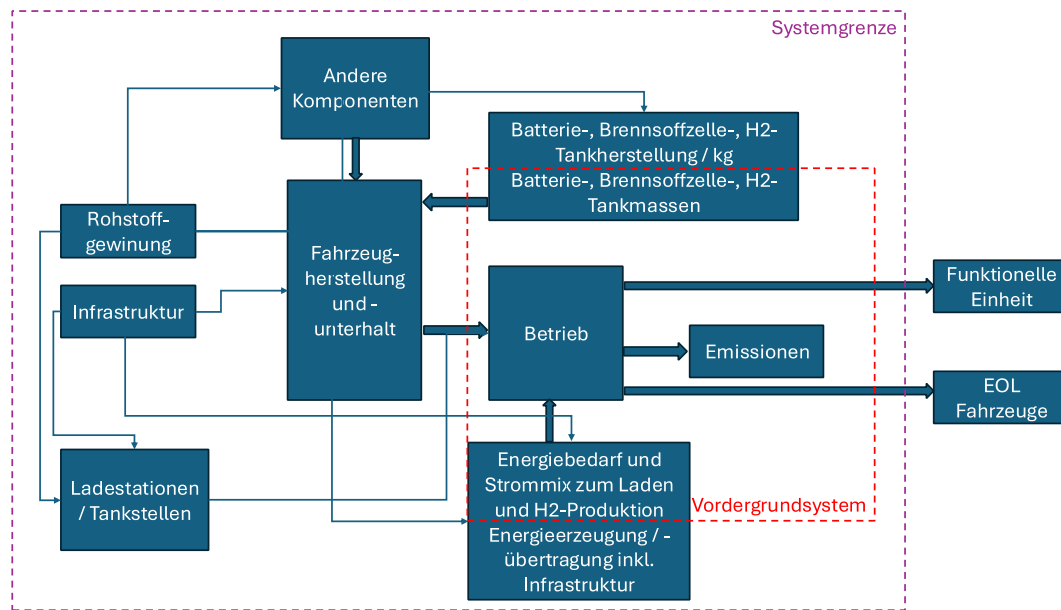
Der effektive Fahrzeug- und Energiebedarf auf den Linien ist abhängig von den Antriebstechnologien und wird in den entsprechenden Tabellen in Kap. 3.3 angegeben.

Tabelle EcoExistence.

3.2.3. Systembeschreibung und -grenze

Die Ökobilanz erfolgt grundsätzlich «von der Wiege bis zur Bahre». Abbildung 9 zeigt ein Systembild mit Vorder- und Hintergrundsystem sowie der Systemgrenze.

Abbildung 9: Vorder- und Hintergrundsystem mit Systemgrenze



Die Prozesse und Produkte im Hintergrundsystem werden mit generischen Daten modelliert. Das Vordergrundsysteem hingegen wird speziell für die verschiedenen Einsatzprofile in diesem Projekt modelliert. So gehören beispielsweise die Herstellung von Antriebsbatterien, Brennstoffzellen und Wasserstofftanks zum Hintergrundsystem, während die nachgefragten Mengen dieser Komponenten zum Vordergrundsysteem gehören. Ebenso gehört die Energiebereitstellung zum Hintergrundsystem, während der für den Fahrzeugbetrieb benötigte Energiebedarf sowie der Strommix (Anteile nach Quellen) für das Laden und die Wasserstoffherstellung zum Vordergrundsysteem gehören. Die Entsorgung der Fahrzeuge wird aufgrund des methodischen Umgangs mit Recyclingprozessen im Modell nicht berücksichtigt.

Grafik EcoExistence

Das Hintergrundsystem verwendet Daten aus der UVEK-Datenbank (Version UVEK-DB 2024) und folgt den für diese Datenbank geltenden Modellierungsprinzipien (DQR_v2 BAFU:2024). Für die Produktion der Antriebsbatterien wurden die aktuellsten Daten von 2025 aus dieser Datenbank verwendet. Grundsätzlich werden alle relevanten Materialien, Produkte und Prozesse berücksichtigt. Allerdings werden Materialien und Produkte, die einem Recyclingprozess zugeführt werden, vernachlässigt¹⁴. Um die in ISO 14'044 geforderte Sensitivitätsanalyse bei

¹⁴ Dieser Cut-off erfolgt ungeachtet der Relevanz dieser Produkte in Bezug auf Masse, Energie oder ökonomischen Wert und steht im Widerspruch zu Kapitel 4.3.4.3 von ISO 14'044.

arbiträr gewählten Modellierungsentscheidungen so weit wie möglich zu erfüllen, wird in einer Sensitivitätsbetrachtung ein zweites Leben der Batterien als stationäre Speicher betrachtet. Um die interne Konsistenz der Studie zu gewährleisten, wird das Vordergrundsystem nach den methodischen Grundsätzen der UVEK-Datenbank modelliert. Für jedes Einsatzprofil werden die Massen von Batterie, Brennstoffzelle und Wasserstofftank spezifisch bestimmt. Wie in 3.2.1 erläutert, werden aufgrund der grossen Unsicherheit hinsichtlich der zukünftigen Eigenschaften dieser Komponenten ein optimistisches (rasche Entwicklung) und ein pessimistisches (langsame Entwicklung) Szenario für die Batterieentwicklung erstellt. Darüber hinaus werden der Energiebedarf und die Betriebsemissionen für jedes Antriebskonzept in jedem Einsatzprofil spezifisch modelliert. Mehr dazu in Kapitel 3.3 (und Anhang A4).

Die Studie soll die Situation in naher Zukunft (ca. 2030) abbilden. Es ist jedoch wichtig zu berücksichtigen, dass die Hintergrunddaten der UVEK-Datenbank vergangene Daten repräsentieren, was bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten ist.

3.2.4. Wirkungsabschätzungsmethoden (LCIA-Methoden)

Um verschiedene Szenarien und Sensitivitäten leichter analysieren zu können, wurde ein modularer Ansatz gewählt. Dabei werden die Wirkungsabschätzungsergebnisse der Hintergrunddaten in einer LCA-Software (OpenLCA) berechnet und nach Excel exportiert. Anschliessend werden die Vordergrundsysteme in Excel modelliert und auf Basis der LCIA-Resultate der Hintergrunddaten berechnet. Dieser Ansatz basiert auf ISO 14'025 und steht formal im Widerspruch zur Vorgabe von ISO 14'044. Die Ergebnisse werden durch die andere Berechnungsart jedoch nicht verändert. Zur Analyse von Beiträgen von Prozessen oder Produkten aus den Vorketten der Hintergrunddatenbank wird wieder auf die OpenLCA Software zurückgegriffen. Von den Auftraggebern wurden folgende Methoden zur Wirkungsabschätzung vorgegeben. Wo nichts anderes vermerkt ist, wurden die in der UVEK-Datenbank implementierten Wirkungsfaktoren verwendet:

- GWP 100 (kg CO₂-eq)
- UBP 2021 (Punkte)
- Primärenergiebedarf erneuerbar (MJ)
- Primärenergiebedarf nicht-erneuerbar (MJ)

Umweltbelastungspunkte (UBP) sind das aggregierte Ergebnis einer Gewichtung verschiedener Schadstoffe oder Wirkungskategorien¹⁵. Die Interpretation der Gesamtergebnisse der Umweltbelastungspunkte ist aufgrund der Aggregation verschiedener potenzieller

¹⁵ Gemäss Abschnitt 4.4.5 von ISO 14'040 ist die Darstellung solcher Ergebnisse in einer vergleichenden Studie, die für die Öffentlichkeit bestimmt ist, nicht zulässig. Daher weicht die Studie in diesem Punkt von der Norm ab.

Umweltauswirkungen oft nicht möglich. Daher werden neben den Gesamtergebnissen der Umweltbelastungspunkte auch die Beiträge zu den einzelnen Umweltauswirkungen berechnet und zur Diskussion der Ergebnisse herangezogen.

Die UBP-Methodik berücksichtigt Verkehrslärm, der für diese Studie von Bedeutung ist. Im Stadtverkehr verursachen elektrisch betriebene Busse bei typischen Geschwindigkeiten nur etwa die Hälfte des Lärms von Bussen mit Verbrennungsmotoren (Althaus u.a. 2009a, Althaus u.a. 2009b). Grund dafür ist, dass bei Bussen mit sehr leisen Elektromotoren hauptsächlich die Roll- und Luftgeräusche relevant sind. Da die UBP-Methodik für Personentransporte auf der Strasse nur Lärmfaktoren für Pkw angibt, verwenden wir für Verbrennerfahrzeuge den entsprechenden Faktor pro Kilometer für den Gütertransport mit LKW. Für elektrisch angetriebene Fahrzeuge verwenden wir die Hälfte dieses Faktors (gemäss Tabelle 123 in BAFU 2021).

Die in der UVEK-Datenbank erfasste Wassernutzung zur Stromerzeugung ist mit der UBP-Methodik nicht kompatibel¹⁶. Daher werden die in Tabelle 103 des UBP-Methodenberichts angegebenen Korrekturfaktoren verwendet.

Zusätzlich zu den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung, werden die direkten¹⁷ und kumulierten Emissionen von NO_x und PM₁₀ sowie die kumulierten Emissionen von CO₂ (alle in kg) ausgewiesen.

3.2.5. Qualitätsanforderungen für Daten

Verschiedene Studien haben gezeigt, dass die Herstellung und Entsorgung von Verbrennerfahrzeugen im Vergleich zu ihrem Betrieb geringe Umweltauswirkungen haben. Bei Elektrofahrzeugen hingegen verursacht der Betrieb praktisch keine Umweltauswirkungen (ausser Lärm und PM aus Abrieb). Daher gewinnen bei Elektrofahrzeugen die Herstellung und Entsorgung an Bedeutung. Beim Vergleich von Verbrenner- und Elektrofahrzeugen ist es besonders wichtig, die Fahrzeugkomponenten, die nur in Elektrofahrzeugen vorkommen, mit qualitativ hochwertigen Daten zu erfassen. Dazu gehören Antriebsbatterien, Brennstoffzellen, Wasserstofftanks, Elektromotoren und Leistungselektronik. Andere Fahrzeugkomponenten wie Fahrgestell, Aufbau usw. weisen bei einem Vergleich kaum Unterschiede auf und können daher grob angenähert werden. Die Daten für den Fahrzeugbetrieb, insbesondere der Energiebedarf und die direkten Emissionen, sind für den Vergleich hingegen sehr relevant und müssen daher von hoher Qualität sein. Auch die Daten zur Bereitstellung von Strom und chemischen Treibstoffen sollten von hoher Qualität sein. Die verwendeten Daten finden sich in Kap. 3.3, eine Einschätzung der Datenqualität wird bei der Diskussion der Ergebnisse in Kap. 4 vorgenommen.

¹⁶ Details in BAFU 2021, Kap. 13.6.9

¹⁷ Gemeint sind die direkt aus dem Betrieb der Busse stammenden Emissionen.

3.2.6. Kritische Prüfung

Da die Studie vergleichende Aussagen enthält und einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird, schreibt ISO 14'044 eine kritische Prüfung vor, die idealerweise von einem Gremium interessierter Kreise durchgeführt wird. Die Auftraggeber der Studie haben inter mit der kritischen Prüfung der Ökobilanzstudie beauftragt. Die Prüfung wurde von Frau Martina Alig (Leiterin des Bereichs «Umwelt & Ressourcenmanagement») und Eveline Volkart (Leiterin des Ökobilanzierungsteams) durchgeführt. Der Prüfbericht ist im Original in Anhang A9 zu finden. Interessierte Kreise waren in der Begleitgruppe des Projektes vertreten und konnten so den Aufbau und die Ergebnisse der Studie mit prüfen. Entsprechend betrachten wir die Anforderung der ISO-Norm als praktisch erfüllt.

3.2.7. Limitationen der Ökobilanz

Die vorliegende Ökobilanz wurde erstellt, um spezifische Fragestellungen zu untersuchen. Entsprechend sind die Ergebnisse nicht allgemeingültig, und eignen sich nur bedingt für generische Fragestellungen. Folgende Punkte sind speziell zu beachten:

- Ein Vergleich der verschiedenen Antriebstechnologien ist nur im Kontext der Anwendungen möglich, die in dieser Studie beispielhaft durch 5 Einsatzprofile berücksichtigt sind. Ein Bezug auf einen Fahrzeug-km ist für die Technologievergleiche nicht möglich, da verschiedene Antriebstechnologien innerhalb von einem Einsatzprofil zu unterschiedlichen jährlichen Fahrleistungen führen können.
- Die Studie vergleicht Technologien in der nahen Zukunft. Darum werden Prognosen für die Entwicklungen der Technologien sowie der Material- und Energiebereitstellung benötigt, die mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind.
- Generische Hintergrunddaten, die in praktisch allen Ökobilanzen benötigt werden, können unmöglich alle unterschiedlichen Schwerpunkte und Ziele der Studien, in denen sie verwendet werden, abdecken. Insbesondere wenn einzelne Produkte oder Prozesse aus den Hintergrunddaten für die Ergebnisse sehr relevant werden, muss dies kritisch hinterfragt werden.

3.3. Inventardaten (LCI)

Die Inventare des Hintergrundsystems (Abbildung 9) stammen aus der UVEK-Datenbank. In Tabelle 5, Tabelle 6, Tabelle 7, Tabelle 8 und Tabelle 9 sind die nachgefragten Mengen für die Fahrzeuge, Batterien, Brennstoffzellen und Wasserstofftanks zusammengestellt. Als Batteriemasse wurde dabei für Standardbusse 3.25 Tonnen und für Gelenkbusse 4 Tonnen

angenommen¹⁸. Diese Massen entsprechen dem Maximum, das im Rahmen der zulässigen Achslasten eingesetzt werden kann, ohne die Passagierkapazität signifikant einzuschränken. Die Energiekapazitäten der Busse wird dann aus Masse und spezifischer Energiekapazität berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Energie- und Leistungsdichten der Systeme im Laufe der Zeit verbessern werden. Daher gehen die Umweltauswirkungen pro Kilowattstunde Batterie bzw. pro Kilowatt Brennstoffzellenleistung¹⁹ bis 2030 zurück. Die jeweiligen Verbesserungsraten wurden aus dem Bericht des Bundesamtes für Energie (BFE) von 2020 übernommen. Für die Ersatzbatterien wird mit denselben Massen gerechnet, wie für die ersten Batterien, obwohl die Reichweite der Busse nach dem Batterieersatz grösser wird. Diese Annahme basiert auf der Beobachtung, dass Transportunternehmen heute meist Busse mit maximaler Reichweite bestellen, auch wenn die Batterie für den geplanten Linieneinsatz überdimensioniert ist.

Die folgenden Tabellen geben auch den Fahrzeugbedarf und die Fahrleistung an. Sie wurden auf Basis der Linien- und Fahrzeugeigenschaften modelliert.

Es wird von einer Einsatzdauer von 12 Jahren für alle Busse ausgegangen. Die Lebensdauer der Batterien in BEV wird mit 1000 Vollladezyklen angenommen. Je nach Batterieentwicklungsszenario und Einsatzprofil entspricht das zwischen 4.9 und 10.9 Jahren. Im LCA- und im Kostenmodell wird der Anteil von der Ersatzbatterie berücksichtigt, der zum Erreichen der 12-jährigen Buslebensdauer noch benötigt wird²⁰. Bei den Batterien der Dieselhybrid- und Brennstoffzellenfahrzeugen und bei den Brennstoffzellen gehen wir von einem Ersatz nach 6 Jahren aus, unabhängig von der Fahrleistung. Diese Vereinfachung ist zulässig, weil die Umweltauswirkungen der Herstellung und Entsorgung dieser Batterien und der Brennstoffzellen nur einen kleinen Teil der Umweltauswirkungen des Einsatzes der entsprechenden Busse ausmachen. Der übrige Unterhalt der Fahrzeuge ist für die Lebenszyklusanalyse (LCA) vernachlässigbar, da er insgesamt wenig relevant ist und sich zwischen den Technologien hauptsächlich in Bezug auf den Motor unterscheidet.

Die Entsorgung der Fahrzeuge bzw. der Komponenten wird nicht spezifisch berücksichtigt, da die Fahrzeuge entweder aufbereitet und weiterverwendet oder recycelt werden. Für diese Studie verzichten wir darauf, für Fahrzeuge, die über 12 Jahre genutzt werden, eine entsprechende Gutschrift für die Umweltauswirkungen der Herstellung zu erteilen.

¹⁸ So resultieren für 2030 Busse mit viel höheren Batteriekapazitäten als sie heute üblich sind. Der Umweltrechner Verkehr geht z.B. von rund 530 kWh Batteriekapazität bei Standard- und Gelenkbusen aus. In dieser Studie liegen die Werte für Standardbusse rund doppelt so hoch und für Gelenkbusse noch höher.

¹⁹ Bei Batterien ist die Energiespeicherkapazität die relevante Grösse, da sie die Reichweite pro Ladung bestimmt. Bei Brennstoffzellen hängt die Reichweite dagegen vom Wasserstofftank ab. Da die Leistung der Brennstoffzelle recht gut mit ihrer Masse korreliert, eignet sie sich gut, um die Umweltauswirkungen daran zu koppeln.

²⁰ In Realität werden die Busse so genutzt/Fahrleistung so verteilt, dass die Batterien am Lebensende der Busse ebenfalls an ihrem Lebensende angekommen sind.

Tabelle 5: Eckdaten zu Diesel-Hybridbus (Euro 7) in den Einsatzprofilen

		OV_SB_HVZ-V	OV_GB_Int	RV-M_GB_Int	RV-B_SB_Int	Bahners_GB
Masse ohne Batterie / Brennstoffzelle / Wasserstofftank	kg	10506	17172	17172	10506	17172
Batterie: Masse	kg	50	50	50	50	50
Batterie: Energiekapazität Brutto	kWh	13	13	13	13	13
Batterie: Energiekapazität Netto	kWh	10	10	10	10	10
Batterie: Energiekapazität nutzbar	kWh	9	9	9	9	9
Spez. Energieverbrauch: Jahresdurchschnitt	kWh/km	2.56	3.21	2.85	2.25	2.93
Spez. Energieverbrauch: Jahresdurchschnitt	l/100 km	25.80	32.34	28.72	22.70	29.57
Fahrzeugbedarf Regelfahrplan	#	6	8	4	4	5
Zusätzliche Fahrzeuge aufgrund Tankvorgänge	#	-	-	-	-	-
Fahrzeugreserve (10%)	#	0.6	0.8	0.4	0.4	0.5
Total Fahrzeugbedarf	#	6.6	8.8	4.4	4.4	5.5
Anzahl Tankstellen im Depot	#	1	1	1	1	1
Zusätzliche Leerfahrten (Betankungen)	#/d	-	-	-	-	-

Daten übernommen / abgeleitet aus den Werten für das Jahr 2030 aus BFE 2020. Ausnahme: Spez. Energieverbrauch wurde auf Basis von Modellierungen in PHEM durch die TU Graz in HBEFA berechnet (cf. Erläuterungen im Text und in Anhang A4).

Tabelle EcoExistence.

Tabelle 6: Eckdaten zu Wasserstoffverbrennerbus in den Einsatzprofilen

		OV_SB_HVZ-V	OV_GB_Int	RV-M_GB_Int	RV-B_SB_Int	Bahners_GB
Masse ohne Batterie / Brennstoffzelle / Wasserstofftank	kg	10415	17064	17064	10415	17064
Wasserstofftank: Masse	kg	636	848	848	636	636
Wasserstofftank: H2-Kapazität	kg H2	60	80	80	60	60
Wasserstofftank: Energiekapazität	kWh	1950	2600	2600	1950	1950
Spez. Energieverbrauch: Jahresdurchschnitt	kWh/km	4.12	5.56	4.76	4.68	4.86
Spez. Energieverbrauch: Jahresdurchschnitt	kg/100 km	12.69	17.09	14.66	14.39	14.95
max. Reichweite pro Betankung	km	473	468	546	417	401
Fahrzeugbedarf Regelfahrplan	#	6	8	4	4	5
Zusätzliche Fahrzeuge aufgrund Tankvorgänge	#	-	-	-	-	-
Fahrzeugreserve (10%)	#	0.6	0.8	0.4	0.4	0.5
Total Fahrzeugbedarf	#	6.6	8.8	4.4	4.4	5.5
Anzahl Tankstellen im Depot	#	1	1	1	1	1
Zusätzliche Leerfahrten (Betankungen)	#/d	-	-	-	-	-

Daten übernommen / abgeleitet aus den Werten für das Jahr 2030 aus BFE 2020. Ausnahme: Spez. Energieverbrauch wurde auf Basis von Modellierungen in PHEM durch die TU Graz in HBEFA berechnet (cf. Erläuterungen im Text und in Anhang A4).

Tabelle EcoExistence.

Tabelle 7: Eckdaten zu Brennstoffzellenbus in den Einsatzprofilen

		OV_SB_HVZ-V	OV_GB_Int	RV-M_GB_Int	RV-B_SB_Int	Bahners_GB
Masse ohne Batterie / Brennstoffzelle / Wasserstofftank	kg	10235	16847	16847	10235	16847
Batterie: Masse	kg	500	500	500	500	500
Batterie: Energiekapazität Brutto	kWh	125	125	125	125	125
Batterie: Energiekapazität Netto	80% von Brutto kWh	100	100	100	100	100
Batterie: Energiekapazität nutzbar	90% von Netto kWh	90	90	90	90	90
Ersatzbatterie: Energiekapazität Brutto	kWh	157	157	157	157	157
Ersatzbatterie: Energiekapazität Netto	80% von Brutto kWh	126	126	126	126	126
Ersatzbatterie: Energiekapazität nutzbar	90% von Netto kWh	113	113	113	113	113
Brennstoffzelle: Leistung	kWh	150	180	180	150	180
Brennstoffzelle: Masse	kg	350	420	420	350	420
Ersatzbrennstoffzelle: Masse	kg	333	399	399	333	399
Wasserstofftank: Masse	kg	318	424	424	318	424
Wasserstofftank: H2-Kapazität	kg H2	30	40	40	30	40
Wasserstofftank: Energiekapazität	kWh	975	1300	1300	975	1300
Spez. Energieverbrauch: Jahresdurchschnitt	kWh/km	1.68	2.30	2.22	2.37	2.34
Spez. Energieverbrauch: Jahresdurchschnitt	kg/100 km	5.15	7.07	6.82	7.30	7.20
max. Reichweite pro Betankung mit erster Bsz	km	582	565	587	411	556
Fahrzeugbedarf Regelfahrplan	#	6	8	4	4	5
Zusätzliche Fahrzeuge aufgrund Tankvorgänge	#	-	-	-	-	-
Fahrzeugreserve (10%)	#	0.6	0.8	0.4	0.4	0.5
Total Fahrzeugbedarf	Durchschnitt über Lebensdauer #	6.6	8.8	4.4	4.4	5.5
Anzahl Tankstellen im Depot	#	1	1	1	1	1
Zusätzliche Leerfahrten (Betankungen)	#/d	-	-	-	-	-

Daten übernommen / abgeleitet aus den Werten für das Jahr 2030 aus BFE 2020. Ausnahme: Spez. Energieverbrauch wurde auf Basis von Modellierungen in PHEM durch die TU Graz in HBEFA berechnet (cf. Erläuterungen im Text und in Anhang A4).

Tabelle EcoExistence.

Tabelle 8: Eckdaten zu Batteriebus (rasche Batterieentwicklung) in den Einsatzprofilen

		OV_SB_HVZ-V	OV_GB_Int	RV-M_GB_Int	RV-B_SB_Int	Bahners_GB
Masse ohne Batterie / Brennstoffzelle / Wasserstofftank	kg	10235	16847	16847	10235	16847
Batterie: Masse	kg	3250	4000	4000	3250	4000
Batterie: Energiekapazität Brutto	kWh	1016	1250	1250	1016	1250
Batterie: Energiekapazität Netto	80% von Brutto kWh	813	1000	1000	813	1000
Batterie: Energiekapazität nutzbar	90% von Netto kWh	731	900	900	731	900
Batterie: Lebensdauer	1000 Vollastzyklen a	10.9	7.0	6.2	6.2	8.8
Ersatzbatterie: Energiekapazität Brutto	kWh	1319	1516	1485	1206	1573
Ersatzbatterie: Energiekapazität Netto	80% von Brutto kWh	1055	1213	1188	965	1258
Ersatzbatterie: Energiekapazität nutzbar	90% von Netto kWh	950	1091	1069	869	1133
Ersatzbatterie: Lebensdauer	1000 Vollastzyklen a	14.2	8.5	7.4	7.3	11.1
Ersatzbatterie: Anzahl	zum Erreichen von 12 Jahren Buslebensdauer #	0.08	0.59	0.78	0.80	0.29
Spez. Energieverbrauch: Jahresdurchschnitt	für LCA-/Kostenberechnung kWh/km	1.25	1.71	1.54	1.47	1.54
Spez. Energieverbrauch: kalter Wintertag	für Dimensionierung Batterie kWh/km	1.63	2.19	1.83	1.77	1.61
max. Reichweite pro Ladung mit erster Batterie	an kalten Wintertagen km	450	411	492	413	558
max. Reichweite pro Ladung mit Ersatzbatterie	an kalten Wintertagen km	584	499	585	490	703
Fahrzeugbedarf Regelfahrplan	#	6	8	4	4	5
Zusätzliche Fahrzeuge aufgrund Ladevorgänge mit erster Batterie	#	-	-	-	-	1
Zusätzliche Fahrzeuge aufgrund Ladevorgänge mit Ersatzbatterie	#	-	-	-	-	-
Fahrzeugreserve (10%)	#	0.6	0.8	0.4	0.4	0.55
Total Fahrzeugbedarf	Durchschnitt über Lebensdauer #	6.6	8.8	4.4	4.4	6.05
Anzahl Ladestationen im Depot	4 Busse pro Ladestation #	1.65	2.20	1.10	1.10	1.51
Zusätzliche Depotein- und Ausfahrten	#	-	-	-	-	-

Daten übernommen / abgeleitet aus den Werten für das Jahr 2030 aus BFE 2020. Ausnahme: Spez. Energieverbrauch wurde auf Basis von Modellierungen in PHEM durch die TU Graz in HBEFA berechnet. Energiebedarf der Heizung wurde separat berechnet und addiert. Weitere Erläuterungen im Text und in Anhang A4.

Der spez. Energieverbrauch: Jahresdurchschnitt beinhaltet die Ladeverluste (10%²¹), entspricht also dem Strombedarf ab Ladestation. Der spez. Energiebedarf: an kalten Wintertagen wird zur Dimensionierung der Batterie genutzt und enthält darum keine Ladeverluste.

Es wird davon ausgegangen, dass zum Ersatz der Hochvoltbatterie Batterien mit einer höheren Energiedichte eingesetzt werden und dass die Fahrzeuge darum eine grössere Reichweite pro Ladung erreichen. So kann jeder Batteriebus nach dem Batteriewechsel auf allen Linien den ganzen Tag eingesetzt werden.

Tabelle EcoExistence.

²¹ Aus HBEFA 5.1, hohe Ladeleistung

Tabelle 9: Eckdaten zu Batteriebus (langsame Batterieentwicklung) in den Einsatzprofilen

			OV_SB_HVZ-V	OV_GB_Int	RV-M_GB_Int	RV-B_SB_Int	Bahners_GB
Masse ohne Batterie / Brennstoffzelle / Wasserstofftank		kg	10235	16847	16847	10235	16847
Batterie: Masse		kg	3250	4000	4000	3250	4000
Batterie: Energiekapazität Brutto		kWh	813	1000	1000	813	1000
Batterie: Energiekapazität Netto	80% von Brutto	kWh	650	800	800	650	800
Batterie: Energiekapazität nutzbar	90% von Netto	kWh	585	720	720	585	720
Batterie: Lebensdauer	1000 Volllastzyklen	a	8.7	5.4	4.9	4.9	6.5
Ersatzbatterie: Energiekapazität Brutto		kWh	1022	1161	1161	943	1213
Ersatzbatterie: Energiekapazität Netto	80% von Brutto	kWh	818	929	929	755	970
Ersatzbatterie: Energiekapazität nutzbar	90% von Netto	kWh	736	836	836	679	873
Ersatzbatterie: Lebensdauer	1000 Volllastzyklen	a	11.0	6.2	5.7	5.7	7.9
Ersatzbatterie: Anzahl	zum Erreichen von 12 Jahren Buslebensdauer	#	0.30	1.07	1.24	1.24	0.69
Spez. Energieverbrauch: Jahresdurchschnitt	für LCA-/Kostenberechnung	kWh/km	1.25	1.71	1.54	1.47	1.54
Spez. Energieverbrauch: kalter Wintertag	für Dimensionierung Batterie	kWh/km	1.63	2.19	1.83	1.77	1.61
max. Reichweite pro Ladung mit erster Batterie	an kalten Wintertagen	km	360	329	394	330	447
max. Reichweite pro Ladung mit Ersatzbatterie	an kalten Wintertagen	km	453	382	457	383	542
Fahrzeugbedarf Regelfahrplan		#	6	8	4	4	5
Zusätzliche Fahrzeuge aufgrund Ladevorgänge mit erster Batterie		#	-	2	1	-	1
Zusätzliche Fahrzeuge aufgrund Ladevorgänge mit Ersatzbatterie		#	-	-	-	-	1
Fahrzeugreserve (10%)		#	0.6	0.9	0.45	0.4	0.6
Total Fahrzeugbedarf	Durchschnitt über Lebensdauer	#	6.6	9.9	4.95	4.4	6.6
Anzahl Ladestationen im Depot	4 Busse pro Ladestation	#	1.65	2.48	1.24	1.10	1.65
Zusätzliche Depotein- und Ausfahrten		#	-	4	2	-	2
Distanz Depot - Linieneinsatz		km	3	3	3	3	20
Zus. Kilometer aufgrund zus. Leerfahrten		km/d	-	12	6	-	40
Zus. Fahrplan-h aufgrund zus. Leerfahrten		h/d	-	0.54	0.19	-	0.8
Anzahl Tage mit Zus.-km aufgrund zus. Leerfahrten		d/a	364	364	302	364	180
Zus. Kilometer aufgrund zus. Leerfahrten		km/a	0	4368	1812	0	7200

Daten übernommen / abgeleitet aus den Werten für das Jahr 2030 aus BFE 2020. Ausnahme: Spez. Energieverbrauch wurde auf Basis von Modellierungen in PHEM durch die TU Graz in HBEFA berechnet. Energiebedarf der Heizung wurde separat berechnet und addiert. Weitere Erläuterungen im Text und in Anhang A4.

Der spez. Energieverbrauch: Jahresdurchschnitt beinhaltet die Ladeverluste (10%²²), entspricht also dem Strombedarf ab Ladestation. Der spez. Energiebedarf: an kalten Wintertagen wird zur Dimensionierung der Batterie genutzt und enthält darum keine Ladeverluste.

Es wird davon ausgegangen, dass zum Ersatz der Hochvoltbatterie Batterien mit einer höheren Energiedichte eingesetzt werden und dass die Fahrzeuge darum eine grössere Reichweite pro Ladung erreichen. So kann jeder Batteriebus nach dem Batteriewechsel auf allen Linien den ganzen Tag eingesetzt werden.

Tabelle EcoExistence.

²² Aus HBEFA 5.1, hohe Ladeleistung

Der Energiebedarf und die direkten Emissionen der Fahrzeuge wurden durch die TU Graz im Modellierungstool PHEM (PHEM 2025) für 365 Verkehrssituationen²³ und 7 Längsneigungen berechnet.

Die Ergebnisse dieser Modellierung wurden nach Anteil Fahrleistung der Verkehrssituation für Linienbusse in der Schweiz aggregiert. Jedes Einsatzprofil hat eine andere Verkehrssituationsverteilung bekommen, die dem Einsatzprofil entspricht. Die Verkehrssituationsverteilungen basieren auf der Schweizer Verteilungen aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren für den Strassenverkehr (HBEFA), Version 5.1 (HBEFA 2025) und wurden leicht angepasst, damit sie den Einsatzprofilen entsprechen (siehe Anhang A4).

In der PHEM-Berechnung wird auch der Leistungsbedarf von Nebenaggregaten (Servolenkung, Druckluft für Bremsen, Heizen und Kühlen, etc.) berücksichtigt. Die Modellierung der Heizung und Kühlung in PHEM erfolgt allerdings unter Annahme einer konstanten durchschnittlichen Temperatur über das ganze Jahr. Die so berechneten Ergebnisse liegen für Batteriebusse deutlich zu tief, weil damit die Situationen im Winter mit hohem Heizwärmebedarf nicht berücksichtigt sind. Bei allen anderen Antriebstechnologien ist die Vereinfachung irrelevant, weil dort mit der Abwärme des Motors bzw. der Brennstoffzelle geheizt werden kann. In diesem Projekt wurde darum der mit PHEM berechnete Heizenergiebedarf aus dem gesamten Energiebedarf der Batteriebusse herausgerechnet. Dafür wurde ein durchschnittlicher Heizenergiebedarf auf Basis von Erfahrungswerten aus dem Betrieb von Elektrobussen des RBS²⁴ im Jahr 2023 und 2024 berechnet und zum korrigierten PHEM-Energiebedarf addiert. Für die Berechnung der maximalen Reichweite von Batteriebussen wurde ein Heizenergiebedarf angenommen, der 3 mal höher liegt als der durchschnittliche Heizenergiebedarf. Die Annahmen und Ergebnisse sind in Anhang A4 (Streuung siehe Abbildung 68) zusammengestellt.

Die Bereitstellung von Diesel an der Tankstelle wird durch Diesel im Regionallager sowie einen Transport zum Busdepot aus der Hintergrunddatenbank abgeschätzt. Der Einfluss der Tankstelleninfrastruktur im Depot wird aufgrund der geringen Relevanz vernachlässigt.

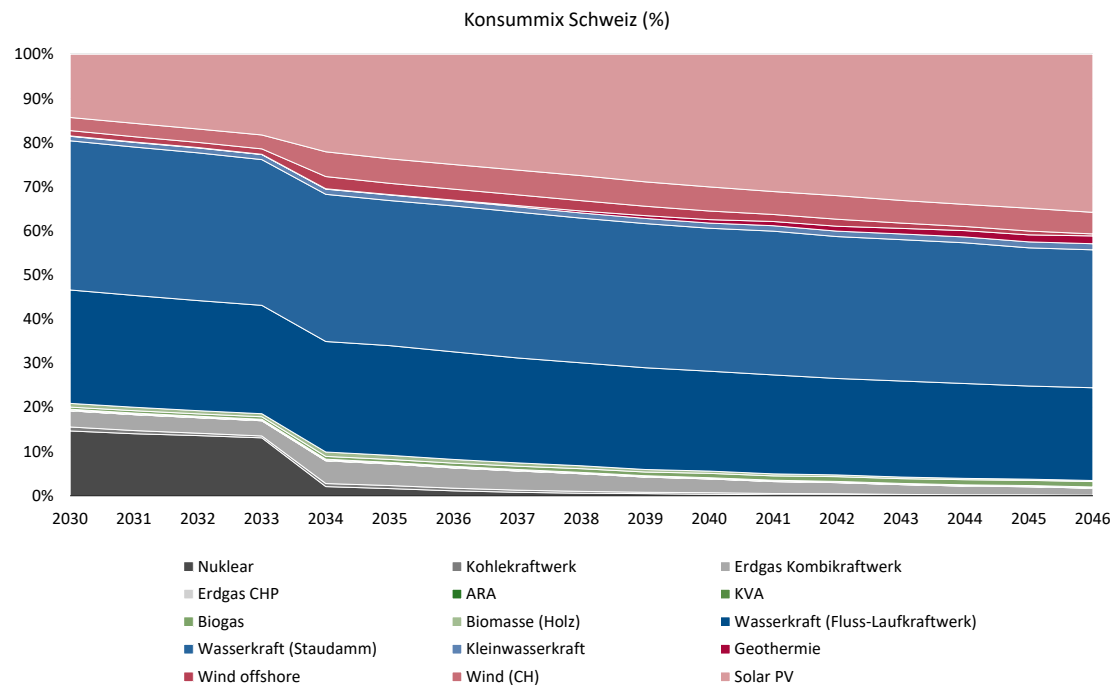
Die Stromerzeugung von 2030 bis 2042, also während der Betriebszeit der betrachteten Busse, wird auf Basis der Stromerzeugungstechnologien der Hintergrunddatenbank berücksichtigt. Die Anteile der verschiedenen Technologien am Schweizer Strommix werden aus den entsprechenden Ergebnissen der Modellierung des ZERO-Basisszenarios der Energieperspektiven 2050+ berechnet. Die Stromimporte in die Schweiz werden anhand des Europäischen Erzeugungsmix der jeweiligen Jahre abgebildet. Abbildung 10 zeigt die Anteile der Erzeugungstechnologien im Mix. Aus den 12 Jahren werden durchschnittliche LCIA-Ergebnisse berechnet, die dann im Hochspannungsnetz transportiert und auf Mittelspannung transformiert werden. Wir

²³ Beispielhafte Verkehrssituationen wären: eine Sammelstrasse in der Agglomeration mit Tempo 50 km/h bei dichtem Verkehr, oder eine Hauptverkehrsstrasse auf dem Land mit Tempo 100 km/h bei flüssigem Verkehr.

²⁴ Regionalverkehr Bern-Solothurn, Persönliche Kommunikation

gehen davon aus, dass sowohl die Busdepots als auch die Elektrolyseanlagen mit Mittelspannung versorgt werden. Die verwendeten Mixe sind in Anhang A6 aufgeführt.

Abbildung 10: Strommix Schweiz 2030 - 2046



Strommix basierend auf den Energieperspektiven des Bundes (EP2050+) im Szenario ZERO-Basis. Importe sind mit dem Europäischen Produktionsmix abgeschätzt.

Grafik EcoExistence

Bei der Wasserstoffelektrolyse wird der Strommix im entsprechenden Datensatz der Hintergrunddatenbank durch den berechneten Strommix ersetzt. Pro Kilogramm Wasserstoff bei 25 bar werden im Durchschnitt 55 Kilowattstunden Strom benötigt (Quelle: UVEK-DB 2024). Darüber hinaus wird ein Energiebedarf von 6.4 Kilowattstunden pro Kilogramm Wasserstoff für die Kompression des Wasserstoffs zum Transport (auf 700 bar) und zur nochmaligen Kompression für die Betankung angesetzt. Ebenfalls berücksichtigen wir basierend auf der Hintergrunddatenbank den Transport des Wasserstoffs zum Busdepot und die dort benötigte Tankstelle. Aus betrieblichen Gründen gehen wir davon aus, dass jedes Busdepot, das Wasserstoffbusse betreiben möchte, über eine entsprechende Tankstelle verfügen muss. Der Einfachheit halber gehen wir davon aus, dass diese Tankstelle nur für das betrachtete Einsatzprofil genutzt wird. Da die Tankstelle nur einen sehr geringen Beitrag zur gesamten Umweltbelastung der Wasserstoffbereitstellung leistet, ist diese Vereinfachung unproblematisch.

Eine Verwendung des künftigen Schweizer Strommixes für die Umweltbetrachtungen ist sinnvoller als die Betrachtung mit rein erneuerbarem Strom. Würde man für das Laden von Batteriebussen oder für die Herstellung von Wasserstoff zum Beispiel 100% Wasserkraft bilanzieren, würde der entsprechende Anteil im Schweizer Strommix fehlen. Damit würde die Umweltwirkung der Busse zwar besser, dafür würde die Umweltwirkung aller anderen Stromanwendungen in der Schweiz aber schlechter. Es wäre also nur eine rechnerische Umverteilung der Schuld, die aber keinen Effekt auf die Umweltsituation der Schweiz hätte. Trotzdem wird in einer Sensitivitätsbetrachtung auch der Fall mit 100% Strom aus einem Flusswasserkraftwerk betrachtet.

3.4. Vorgehen und Methodik Gesamtkosten

Die Entwicklung der Gesamtkosten, der so genannten «Total Cost of Ownership» (TCO), ist ein wichtiger Faktor bei der Bewertung der verschiedenen Antriebstechnologien. Die Quantifizierung der TCO erfolgt mittels einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsrechnung, nach der Nettobarwert-Methode. Dabei werden sämtliche Kostenströme über einen definierten Zeitraum – konkret über eine Fahrzeuggeneration – berücksichtigt. Auch Ersatzbeschaffungen einzelner Fahrzeugkomponenten, wie z.B. Batterien und Brennstoffzellen, werden betrachtet. Damit können – im Vergleich zu einer statischen Kostenrechnung mit Jahreskosten – insbesondere Sensitivitäten bezüglich der Batterieentwicklung besser abgebildet werden. Die folgenden Aspekte werden im Detail betrachtet und zusammen mit generischen Werten für die übrigen betrieblichen Kosten (z.B. für Fahrpersonal und Versicherungen) dargestellt:

- Fahrzeuge: Beschaffungs- und Unterhaltskosten sowie Batterie- oder Brennstoffzellenersatz
- Lade- und Tankinfrastruktur: Investitions- und Wartungs-/Unterhaltskosten
- Energiekosten für Strom und Treibstoff
- Zusätzliche Fahrpersonalkosten bedingt durch die betrieblichen Auswirkungen der jeweiligen Antriebsoption (z.B. zusätzliche Fahrzeugumläufe infolge von Ladevorgängen).

Die TCO-Berechnungen erfolgen ab dem Beschaffungszeitpunkt im Jahr 2030. Analog zur LCA-Berechnung werden fünf Antriebsoptionen (vgl. Tabelle 2) und fünf praxisnahe Einsatzszenarien (vgl. Tabelle 3) berücksichtigt. Für die einzelnen Kostenströme werden Annahmen zu den künftigen Preisentwicklungen getroffen. Vor allem für die Depotladervarianten ist – abhängig von der Reichweitenentwicklung – von massgeblichen Betriebskostenreduktionspotenzialen im Verlauf der nächsten Jahre auszugehen.

Die jeweiligen Mehrkosten zwischen den berücksichtigten Kostenelementen werden in den Kontext der Vollkosten (inklusive der übrigen betrieblichen Kosten) gestellt. Als Ergebnis lassen

sich die Mehrkosten der nicht fossilen Antriebskonzepte gegenüber der Referenztechnologie (Hybrid-Dieselbus Euro 7) für die verschiedene Einsatzszenarien darstellen.

Weitere wichtige Bemerkungen zur Kostenbetrachtung bzw. Abgrenzung:

- Beim Diesel-Hybrid sind die Tankstellenkosten im Treibstoffpreis (anteilmässig) enthalten.
- Beim Brennstoffzellen- und Wasserstoffverbrennerbus werden Kosten für eine eigene Tankanlage (ohne Elektrolyseur) berücksichtigt. Die Rechtfertigung dafür ist, dass ein Transportunternehmen, das auf Wasserstoffbusse setzt, aus betrieblichen Gründen in den allermeisten Fällen eine Wasserstofftankstelle im Depot benötigen würde. Nach Berechnungen einer aktuellen BAV-Studie zum Wasserstoff auf Bahnbaustellen rechnet sich die Eigenproduktion durch Elektrolyse in der Schweiz nur bei sehr hohem Tagesbedarf von über 450 kg H₂, selbst unter der Annahme von Bahnstrom (BAV 2024, Abb. 16)²⁵. Der Tagesbedarf der ausgewählten Einsatzprofile liegt zwischen 150 – 380 kg für H₂-ICE und 60 – 180 kg für FCEB. Dementsprechend wurde eine Trailer-Versorgung ausgewählt. Aufgrund des deutlich höheren Tagesbedarfs und der damit verbundenen Speichergrösse fallen für den Wasserstoffverbrenner jedoch höhere Infrastrukturkosten an (BAV 2024).
- Die Depotladervarianten unterscheiden sich hinsichtlich der Batteriekapazität (in kWh), da bei gleichbleibender Batteriemasse (in kg) unterschiedliche Entwicklungen der Energiedichte (in kWh/kg) angenommen werden – entweder eine langsamere oder eine schnellere. Gleichzeitig wird angenommen, dass die Batteriekosten pro kWh schneller sinken, wenn sich die Batterietechnologie rascher entwickelt.

3.5. Zusätzliche Annahmen für die Kostenrechnung

Die Annahmen basieren auf relevanter und aktueller Literatur für die zu untersuchenden Antriebstechnologien sowie auf der langjährigen Erfahrung von INFRAS in diesem Bereich. Tabelle 10 fasst die allgemeinen Annahmen zusammen, die für alle Einsatzprofile relevant sind. Grundsätzlich werden konservative Annahmen für Batteriebusse getroffen, während die Annahmen für Wasserstoff realistisch sind, aber auf Wasserstoff-förderlichen Bedingungen. Damit wird geprüft, ob Wasserstoffverbrenner unter eher günstigen Bedingungen wirtschaftlich attraktiv sein können. Verschiedene Kostenannahmen werden im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse (Abschnitt 5.2) betrachtet, um die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen.

²⁵ Bei Marktpreisen wird die Eigenproduktion weniger attraktiv: Aufgrund des hohen Energieverbrauchs der Elektrolyseure steigen die Herstellungskosten um etwa 30%. Im Vergleich verteuert sich der gelieferte Wasserstoff durch den Energieverbrauch der Verdichter lediglich um 6%.

Tabelle 10: Allgemeine Annahmen für alle Einsatzprofile

		Wert	Einheit	Quelle
Basisjahr		2030		
Realer Zinssatz		1.5	%	BFE 2020
Fahrzeugreserve		10	%	BFE 2020
Ladeleistung der Ladestationen im Depot		150	kW	Annahme INFRAS
Anzahl Fahrzeuge pro Ladepunkt im Depot, für Depotlader		1	#	BFE 2020
Zusätzlicher Fahrpersonalaufwand für Fahrt in bzw. aus Depot, pro ausgetauschtes Fahrzeug		20	min	BFE 2020
Fahrpersonalkosten (bei zusätzlichen Fahrzeugumläufen)		65	CHF/h	BFE 2020
Lebensdauer	Fahrzeug	12	Jahre	BFE 2020
	Batterie (BEV)	1'000	Vollladezyklen	Annahme INFRAS / EcoExistence
	Batterie (FCEV, Diesel-Hybrid)	6	Jahre	BFE 2020
	Brennstoffzelle	6	Jahre	BFE 2020
	Ladestationen im Depot	12	Jahre	BFE 2020
	Stromanschluss im Depot	30	Jahre	BFE 2020
	H ₂ -Tankstelle	20	Jahre	FCH 2 JU 2018
Kostensatz	Strom (zum Laden)	0.28	CHF/kWh	EICom 2025, BFE 2022b
	Wasserstoff (ohne Netzkosten)	10.00	CHF/kg	BFE 2022a, BAV 2024
	Diesel	1.80	CHF/L	ASTAG 2025
	Ad Blue	0.59	CHF/L	BFE 2020
Mineralölsteuerrückstellung Diesel		0	CHF/L	

Tabelle INFRAS.

Tabelle 11 und Tabelle 12 zeigen die Kostenannahmen, die sich je nach Einsatzprofil und Antriebstechnologie unterscheiden. Fahrzeugkosten werden pro Bus aufgeführt und Infrastrukturkosten pro Einsatzprofil. Es gelten die gleichen Fahrzeug-Eckdaten wie in den Einsatzprofilen dargestellt (vgl. Tabelle 5 - Tabelle 9).

In der Berechnung fallen die Anschaffungs- und Investitionskosten im Jahr 2030 an. Die Investitionskosten für Infrastrukturen mit einer längeren Lebensdauer als die Fahrzeugnutzung werden vollständig im Jahr 2030 verbucht. Der anteilige Restwert, der über die Fahrzeuglebensdauer hinausgeht, wird am Ende der Fahrzeugnutzung angerechnet. Unterhalts- und Energiekosten werden jährlich berücksichtigt. Ersatzkosten für Batterien und Brennstoffzellen entstehen im Jahr ihres Austauschs, basierend auf den Lebensdauern gemäss Tabelle 10. Die Lebensdauern der BEV-Batterien werden – wie in Abschnitt 3.3 beschrieben – in Jahren umgerechnet.

Tabelle 11: Annahmen Batterieelektrischer Bus (langsame Batterieentwicklung oben, rasche Batterieentwicklung unten)

Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung				
		OV_SB_HVZ-V	OV_GB_Int	RV-M_GB_Int	RV-B_SB_Int	Bahners_GB
Anschaffungskosten pro Bus (ohne Ersatz-Batterie)	CHF	547'111	730'938	730'938	547'111	730'938
Fahrzeugproduktion und -entsorgung, ohne Batterie	CHF	338'375	474'032	474'032	338'375	474'032
Batterieproduktion und -entsorgung	CHF	208'736	256'905	256'905	208'736	256'905
Ersatz-Batterieproduktion und -entsorgung	CHF	149'001	183'386	183'386	149'001	183'386
Batterieproduktion und -entsorgung	CHF/kWh	257	257	257	257	257
Ersatz-Batterieproduktion und -entsorgung	CHF/kWh	183	183	183	183	183
Wartungskosten	CHF/km	0.30	0.40	0.40	0.30	0.40
Energie / Ad-Blue-Kosten	CHF/km	0.32	0.43	0.42	0.34	0.41
Energieverbrauch (Jahresdurchschnitt)	kWh/km	1.31	1.80	1.77	1.42	1.72
Ad-Blue-Verbrauch	L/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ladestation Ladeleistung	kW/Stk	150	150	150	150	150
Ladestation Investitionskosten	CHF/Stk	85'000	85'000	85'000	85'000	85'000
Ladestation Unterhalt	CHF/a/Stk	4'250	4'250	4'250	4'250	4'250
Anschlussleistung im Depot	kW	1'000	4'000	1'000	1'000	1'000
Anschlusskosten im Depot	CHF	210'000	650'000	210'000	210'000	210'000
Fahrzeug-Fixkosten (bei zusätzlichem Fahrzeugbedarf)(Garagierung, Versicherung, Unterhalt etc.)	CHF/a/Bus	30'000	30'000	30'000	30'000	30'000
Angenommene Anteile der analysierten Kostenblöcke an Linienvollkosten (inkl. Fahrpersonal, Verwaltung/Gemeinkosten)	%	30%	35%	35%	30%	35%

Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung				
		OV_SB_HVZ-V	OV_GB_Int	RV-M_GB_Int	RV-B_SB_Int	Bahners_GB
Anschaffungskosten pro Bus (ohne Ersatz-Batterie)	CHF	534'036	714'846	714'846	534'036	714'846
Fahrzeugproduktion und -entsorgung, ohne Batterie	CHF	338'375	474'032	474'032	338'375	474'032
Batterieproduktion und -entsorgung	CHF	195'661	240'814	240'814	195'661	240'814
Ersatz-Batterieproduktion und -entsorgung	CHF	151'570	186'548	186'548	151'570	186'548
Batterieproduktion und -entsorgung	CHF/kWh	193	193	193	193	193
Ersatz-Batterieproduktion und -entsorgung	CHF/kWh	149	149	149	149	149
Wartungskosten	CHF/km	0.30	0.40	0.40	0.30	0.40
Energie / Ad-Blue-Kosten	CHF/km	0.32	0.43	0.42	0.34	0.41
Energieverbrauch (Jahresdurchschnitt)	kWh/km	1.31	1.80	1.77	1.42	1.72
Ad-Blue-Verbrauch	L/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ladestation Ladeleistung	kW/Stk	150	150	150	150	150
Ladestation Investitionskosten	CHF/Stk	85'000	85'000	85'000	85'000	85'000
Ladestation Unterhalt	CHF/a/Stk	4'250	4'250	4'250	4'250	4'250
Anschlussleistung	kW	1'000	4'000	1'000	1'000	1'000
Anschlusskosten im Depot	CHF	210'000	650'000	210'000	210'000	210'000
Fahrzeug-Fixkosten (bei zusätzlichem Fahrzeugbedarf)(Garagierung, Versicherung, Unterhalt etc.)	CHF/a/Bus	30'000	30'000	30'000	30'000	30'000
Angenommene Anteile der analysierten Kostenblöcke an Linienvollkosten (inkl. Fahrpersonal, Verwaltung/Gemeinkosten)	%	30%	35%	35%	30%	35%

Tabelle INFRAS. Quellen: INFRAS-e-Bus-Tool 2025, BFE 2020, European Commission, Joint Research Centre 2024, Interviews mit Herstellern

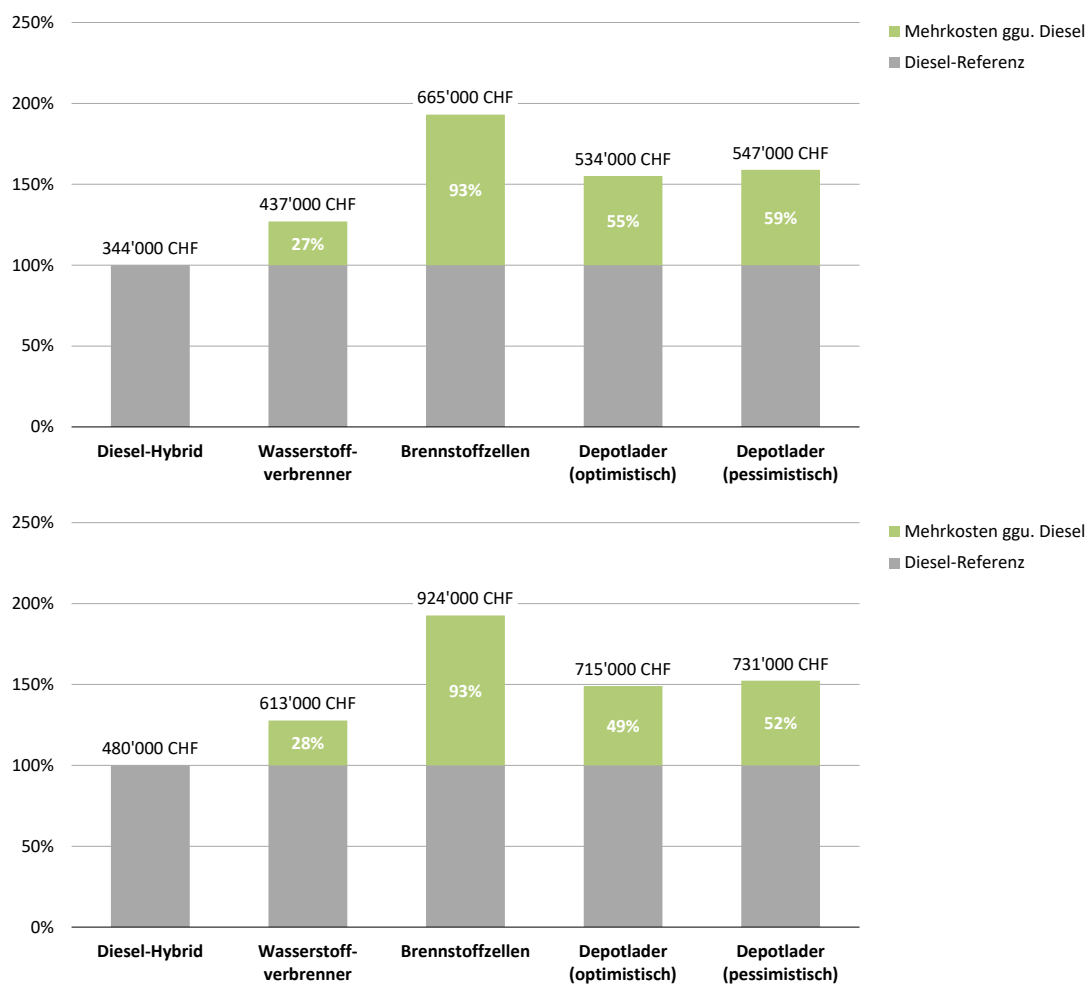
Tabelle 12: Annahmen Brennstoffzellenbus (oben), Wasserstoffverbrennungsbus (Mitte) und Diesel-Hybridbus (unten)

Brennstoffzellenbus (H2)		OV_SB_HVZ-V	OV_GB_Int	RV-M_GB_Int	RV-B_SB_Int	Bahners_GB
Anschaffungskosten pro Bus (ohne Ersatz-Batterie/-Brennstoffzelle)	CHF	664'563	924'242	924'242	664'563	924'242
Fahrzeugproduktion und -entsorgung, ohne Batterie, Brennstoffzelle und Wasserstofftank	CHF	445'516	663'972	663'972	445'516	663'972
Batterieproduktion und -entsorgung	CHF	32'113	32'113	32'113	32'113	32'113
Brennstoffzellenproduktion und -entsorgung	CHF	158'156	189'787	189'787	158'156	189'787
Wasserstofftankproduktion und -entsorgung (350 Bar)	CHF	28'777	38'370	38'370	28'777	38'370
Ersatz-Batterieproduktion und -entsorgung	CHF	22'923	22'923	22'923	22'923	22'923
Ersatz-Brennstoffzellenproduktion und -entsorgung	CHF	125'048	150'057	150'057	125'048	150'057
Batterieproduktion und -entsorgung	CHF/kWh	257	257	257	257	257
Ersatz-Batterieproduktion und -entsorgung	CHF/kWh	183	183	183	183	183
Brennstoffzellenproduktion und -entsorgung	CHF/kW	1'054	1'054	1'054	1'054	1'054
Ersatz-Brennstoffzellenproduktion und -entsorgung	CHF/kW	834	834	834	834	834
Wartungskosten	CHF/km	0.42	0.56	0.56	0.42	0.56
Energie / Ad-Blue-Kosten	CHF/km	0.52	0.71	0.68	0.73	0.72
Energieverbrauch (Jahresdurchschnitt)	kWh/km	1.68	2.30	2.22	2.37	2.34
Ad-Blue-Verbrauch	L/km	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Wasserstofftankstelle (exkl. Elektrolyse) Investition	CHF/Stk	910'000	910'000	910'000	910'000	910'000
Wasserstofftankstelle (exkl. Elektrolyse) Unterhalt	CHF/a	18'200	18'200	18'200	18'200	18'200
Fahrzeug-Fixkosten (bei zusätzlichem Fahrzeugbedarf)(Garagierung, Versicherung, Unterhalt etc.)	CHF/a/Bus	30'000	30'000	30'000	30'000	30'000
Angenommene Anteile der analysierten Kostenblöcke an Linienvollkosten (inkl. Fahrpersonal, Verwaltung/Gemeinkosten)	%	30%	35%	35%	30%	35%
Wasserstoffverbrennungsbus		OV_SB_HVZ-V	OV_GB_Int	RV-M_GB_Int	RV-B_SB_Int	Bahners_GB
Anschaffungskosten pro Bus	CHF	437'088	612'930	612'930	437'088	612'930
Fahrzeugproduktion und -entsorgung, ohne Wasserstofftank	CHF	379'534	536'191	536'191	379'534	536'191
Wasserstofftankproduktion und -entsorgung (350 Bar)	CHF	57'555	76'739	76'739	57'555	76'739
Wartungskosten	CHF/km	0.40	0.53	0.53	0.40	0.53
Energie / Ad-Blue-Kosten	CHF/km	1.28	1.72	1.47	1.45	1.50
Energieverbrauch (Jahresdurchschnitt)	kWh/km	4.12	5.56	4.76	4.68	4.86
Ad-Blue-Verbrauch	L/km	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Wasserstofftankstelle (exkl. Elektrolyse) Investition	CHF/Stk	1'300'000	1'300'000	1'300'000	1'300'000	1'300'000
Wasserstofftankstelle (exkl. Elektrolyse) Unterhalt	CHF/a	26'000	26'000	26'000	26'000	26'000
Fahrzeug-Fixkosten (bei zusätzlichem Fahrzeugbedarf)(Garagierung, Versicherung, Unterhalt etc.)	CHF/a/Bus	30'000	30'000	30'000	30'000	30'000
Angenommene Anteile der analysierten Kostenblöcke an Linienvollkosten (inkl. Fahrpersonal, Verwaltung/Gemeinkosten)	%	30%	35%	35%	30%	35%
Diesel-Hybridbus (Euro 7)		OV_SB_HVZ-V	OV_GB_Int	RV-M_GB_Int	RV-B_SB_Int	Bahners_GB
Anschaffungskosten pro Bus (ohne Ersatz-Batterie)	CHF	344'153	479'810	479'810	344'153	479'810
Fahrzeugproduktion und -entsorgung, ohne Batterie	CHF	340'941	476'599	476'599	340'941	476'599
Batterieproduktion und -entsorgung	CHF	3'211	3'211	3'211	3'211	3'211
Ersatz-Batterieproduktion und -entsorgung	CHF	2'292	2'292	2'292	2'292	2'292
Batterieproduktion und -entsorgung	CHF/kWh	257	257	257	257	257
Ersatz-Batterieproduktion und -entsorgung	CHF/kWh	183	183	183	183	183
Wartungskosten	CHF/km	0.40	0.53	0.53	0.40	0.53
Energie / Ad-Blue-Kosten	CHF/km	0.47	0.59	0.53	0.42	0.54
Energieverbrauch (Jahresdurchschnitt)	kWh/km	2.56	3.21	2.85	2.25	2.93
Ad-Blue-Verbrauch	L/km	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Angenommene Anteile der analysierten Kostenblöcke an Linienvollkosten (inkl. Fahrpersonal, Verwaltung/Gemeinkosten)	%	30%	35%	35%	30%	35%

Tabelle INFRAS. Quellen: INFRAS e-Bus-Tool 2025, BFE 2020, European Commission, Joint Research Centre 2024, Interviews mit Herstellern

In Abbildung 11 sind die angenommenen Anschaffungskosten der Fahrzeuge dargestellt, differenziert nach Antriebstechnologie und Busgrösse. Die Anschaffungskosten von Wasserstoffverbrennerbussen liegen etwa 30% über denen von Diesel-Hybridbussen. Depotlader sind in der Anschaffung rund 50–60% teurer als Diesel-Hybridbusse, Brennstoffzellenbusse sogar etwa 90%. Die Kosten der Depotlader (pessimistisch) und Depotlader (optimistisch) unterscheiden sich nur geringfügig. Da von einer konstanten Batteriemasse ausgegangen wird, steigt im optimistischen Fall die Batteriekapazität aufgrund einer verbesserten Energiedichte. Die dadurch entstehenden Mehrkosten werden jedoch durch sinkende spezifische Batteriepreise (in CHF/kWh) kompensiert.

Abbildung 11: Anschaffungskosten Standardbus (oben) und Gelenkbus (unten)



Grafik INFRAS

4. Berechnung der Umweltauswirkungen (LCA-Ergebnisse)

Die Umweltauswirkungen werden anhand der in Kapitel 3 beschriebenen Methoden und Daten berechnet. Wie bereits erwähnt, können die Ergebnisse der verschiedenen Einsatzprofile nicht untereinander verglichen werden, da sie jeweils andere funktionelle Einheiten haben. Daher werden sie in einzelnen Kapiteln besprochen. In Kapitel 4.7 wird dann ein Fazit aus den Ergebnissen aller Einsatzprofile gezogen und diskutiert.

Die Ergebnisse sind auch nicht vergleichbar mit Ergebnissen aus anderen Studien oder zum Beispiel dem Umweltrechner Verkehr. Wir verwenden zwar prinzipiell dieselben Hintergrunddaten und Modellierungsgrundsätze wie der Umweltrechner Verkehr, aber während der Umweltrechner die durchschnittliche Situation in der Schweiz Anfang der 2020er Jahren abbildet, betrachten wir in dieser Studie sehr spezifische Einsätze in den Jahren 2030-2042. Die wichtigsten Unterschiede liegen im Energiebedarf der Fahrzeuge, im Strommix zum Laden der Fahrzeuge und zur Wasserstoffproduktion und in den installierten Batteriekapazitäten, die in unserer Studie rund doppelt so hoch sind, wie im Umweltrechner und für sehr anspruchsvolle Anwendungen nötig sind.

Die folgenden Unterkapitel zeigen und diskutieren die Ergebnisse für die verschiedenen Einsatzprofile.

4.1. Standardbus in Orts-/Agglomerationslinie mit HVZ-Verdichtung

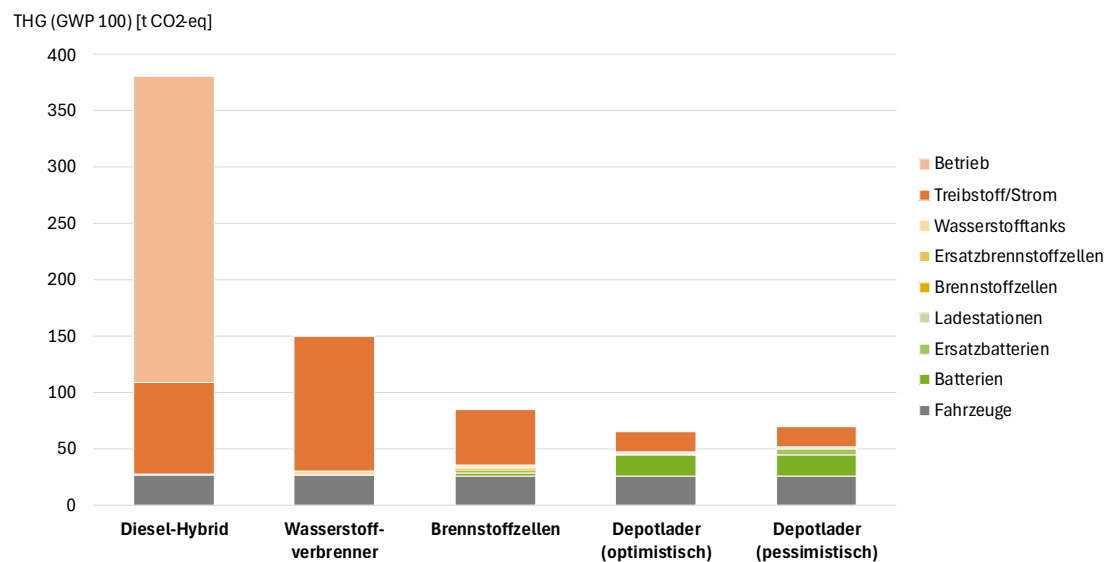
In diesem Einsatz zeigen die Batteriebusse in beiden Szenarien, dem raschen (optimistisch) und dem langsamen (pessimistisch) Verbesserungsszenario der Batterien, identische Ergebnisse. Dies liegt daran, dass ab 2030 in beiden Szenarien eine ausreichende Reichweite gewährleistet ist, sodass ein Aufladen während des Tages nicht erforderlich ist.

4.1.1. Treibhausgasemissionen

Abbildung 12 zeigt, dass Elektrobusse (mit Batterie oder Brennstoffzelle) die niedrigsten Gesamt-Treibhausgasemissionen aufweisen, wenn man den zukünftigen Schweizer Konsummix für das Laden und die Wasserstoffproduktion berücksichtigt. Der Einsatz von Wasserstoffverbrennerbussen anstelle von Elektro-Brennstoffzellenbussen würde die jährlichen Treibhausgasemissionen verdoppeln. Diesel-Hybridbusse würden sogar bis zu 6-mal höhere Emissionen verursachen. Die direkten Emissionen aus dem Betrieb sind nur bei Dieseln relevant. Bei Wasserstoffbussen trägt die Bereitstellung des Wasserstoffs am meisten zu den Emissionen bei. Da Wasserstoffverbrenner etwa 2.5-mal so viel Energie benötigen wie Brennstoffzellenfahrzeuge, ist der Beitrag der Treibstoffherstellung bei ersteren Bussen sogar klar dominant.

Batteriebusse sind deutlich effizienter als Brennstoffzellenbusse, und die Ladeverluste sind deutlich geringer als der Energieverlust bei der Wasserstoffherstellung aus Strom. Daher trägt die Strombereitstellung beim Einsatz von Batteriebussen wenig zu den gesamten Treibhausgasemissionen bei. Wichtiger ist hier die Produktion der Batterien, die bei anderen Technologien kaum relevant ist. Es ist wichtig zu beachten, dass der Datensatz davon ausgeht, dass die Batterien mit dem chinesischen Strommix von 2024 produziert werden, der mit 0.7 kg CO₂-eq/kWh noch sehr viel klimaschädlicher ist als der Schweizer Strommix. Sollte die Produktion in Zukunft mit höheren Anteilen an erneuerbarer Energie erfolgen, könnte der Beitrag von Batterien deutlich geringer ausfallen.

Abbildung 12: Technologievergleich: Treibhausgasemissionen pro Jahr in OV_SB_HVZ-V

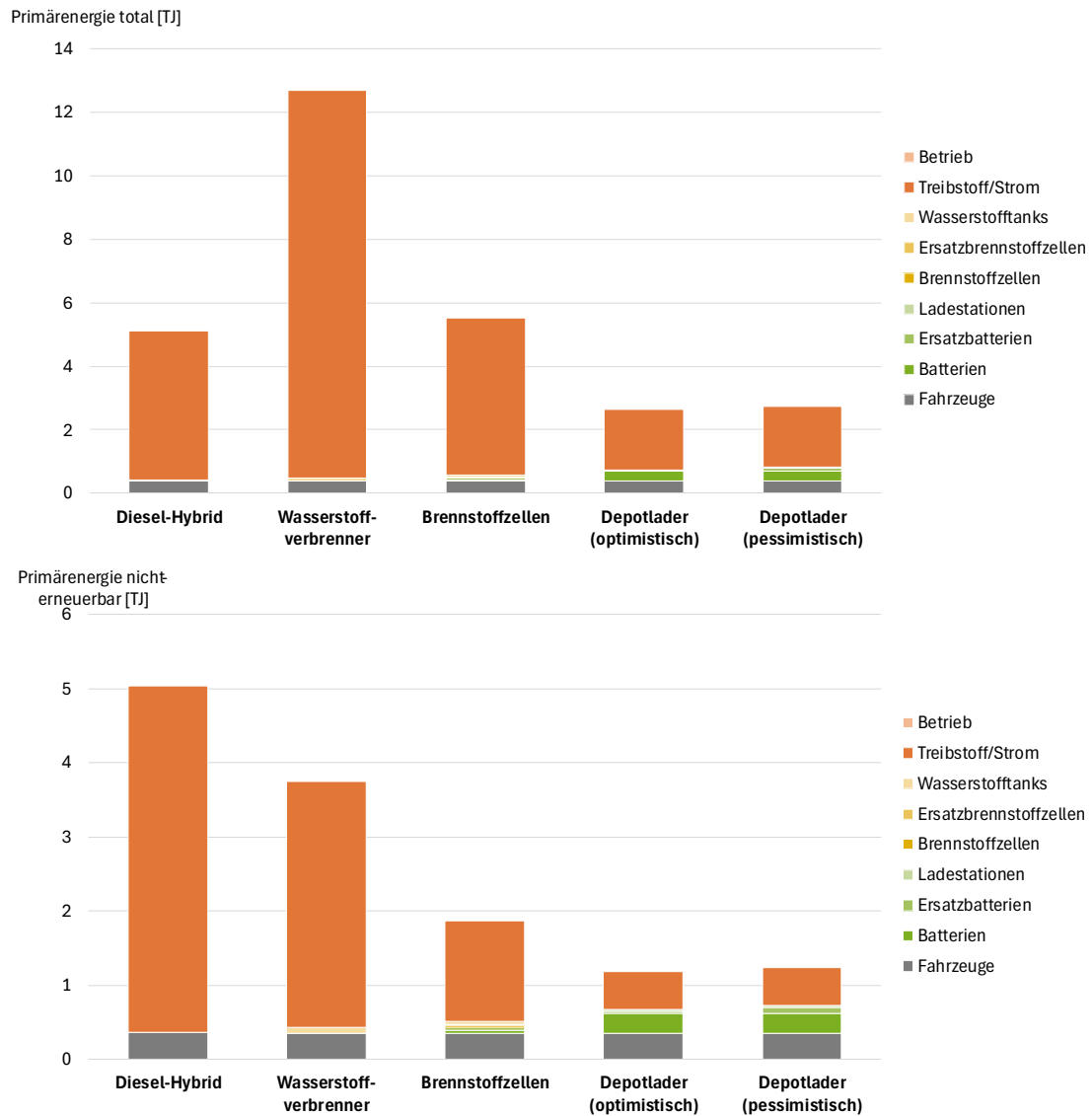


Grafik EcoExistence

4.1.2. Primärenergiebedarf

Abbildung 13 zeigt den jährlichen Bedarf an Primärenergie, sowohl insgesamt als auch nicht erneuerbar, für dieses Einsatzprofil. Batteriebusse sind in Bezug auf diese Wirkungsindikatoren klar die erste Wahl. Wasserstoffverbrennerbusse benötigen aufgrund der geringen Effizienz des Verbrennungsmotors und der erheblichen Energieverluste bei der Wasserstoffherzeugung die höchste Menge an Primärenergie, um dieses Fahrprofil zu erfüllen. Brennstoffzellenbusse benötigen etwa die gleiche Menge an Primärenergie wie Diesel-Hybridbusse. Dies liegt erneut an der schlechten Energieeffizienz der Wasserstoffherstellung und der Umwandlung von Wasserstoff zurück in Strom durch die Brennstoffzelle.

Abbildung 13: Technologievergleich: Primärenergie pro Jahr in OV_SB_HVZ-V



Skalierung der x-Achse der beiden Grafiken ist unterschiedlich.

Grafik EcoExistence

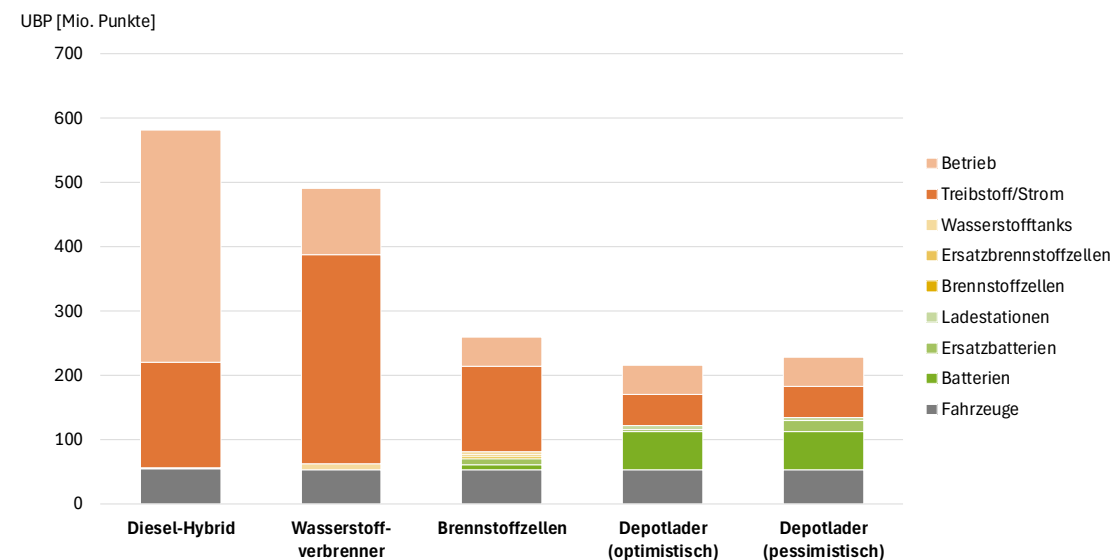
Dieselbusse haben den höchsten Anteil an nicht erneuerbaren Primärenergieträgern. Dies liegt daran, dass die zukünftige Stromproduktion einen hohen Anteil an erneuerbaren Quellen haben wird, was den Indikator für Wasserstoff- und Batteriefahrzeuge niedrig hält. Im Gegensatz dazu ist der Bedarf an erneuerbaren Primärenergieträgern (Differenz von «Total» und «nicht-erneuerbar»; ohne Grafik) für Dieselbusse praktisch gleich Null. Auch in dieser Hinsicht

schneiden Batteriebusse deutlich besser ab als Brennstoffzellenbusse, die wiederum weniger als halb so viel erneuerbare Primärenergie benötigen wie Wasserstoffverbrenner.

4.1.3. Umweltbelastungspunkte

Die Bewertung mittels Umweltbelastungspunkten (Abbildung 14) zeigt im Vergleich ein ähnliches Bild wie die Klimawirkung (Abbildung 12). Batterie- und Brennstoffzellenbusse verursachen deutlich weniger Umweltbelastungspunkte als Verbrennerbusse, wobei Brennstoffzellenbusse einen kleinen Nachteil gegenüber Batteriebussen aufweisen²⁶.

Abbildung 14: Technologievergleich: Umweltbelastungspunkte pro Jahr in OV_SB_HVZ-V

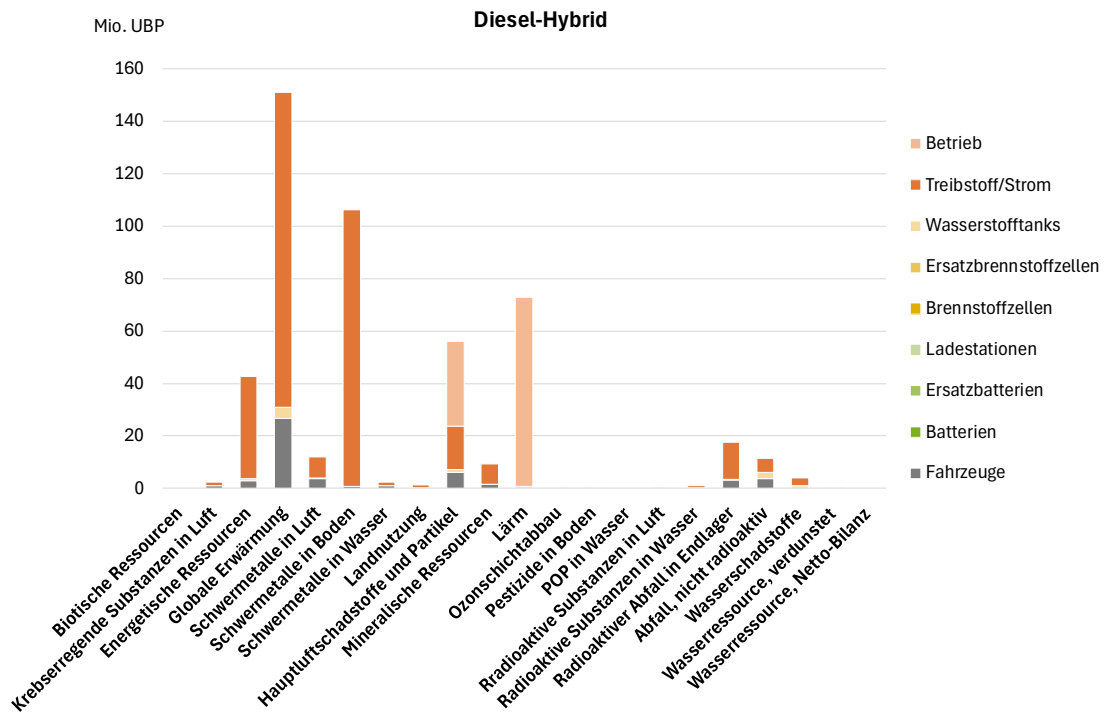


Grafik EcoExistence

Diesel-Hybridbusse weisen einen UBP-Wert auf, der hauptsächlich von direkten Emissionen im Betrieb (62%) bestimmt wird (Abbildung 15). Treibhausgasemissionen tragen dabei mit 75% zum UBP-Wert des Betriebs bei. Lärm (20%) und Hauptluftschadstoffe (5%) machen den Rest aus. Die Treibstoffproduktion trägt 28% zur UBP dieser Fahrzeuge bei. Dieser Anteil wird hauptsächlich von der Klimawirkung (52%), der Entnahme energetischer Ressourcen (24%) und Hauptluftschadstoffen (10%) verursacht. Die verbleibenden 10% der UBP stammen aus der Fahrzeugproduktion, die wiederum zu 50% von Klimawirkungen dominiert wird. Insgesamt machen Treibhausgasemissionen 65% der Gesamt-UBP von Diesel-Hybridbussen in diesem Einsatzprofil aus. Lärm trägt 13% zur UBP bei, Hauptluftschadstoffe und energetische Ressourcen je 7%.

²⁶ Der Unterschied zwischen Brennstoffzellen- und Batteriebussen ist geringer als in Studien, die durchschnittliche aktuell eingesetzte Busse vergleicht, weil Batteriebusse in dieser Studie viel grössere Batteriekapazitäten aufweisen.

Abbildung 15: Beiträge der Umweltauswirkungen zu den gesamten UBP von Diesel-Hybrid-Bussen

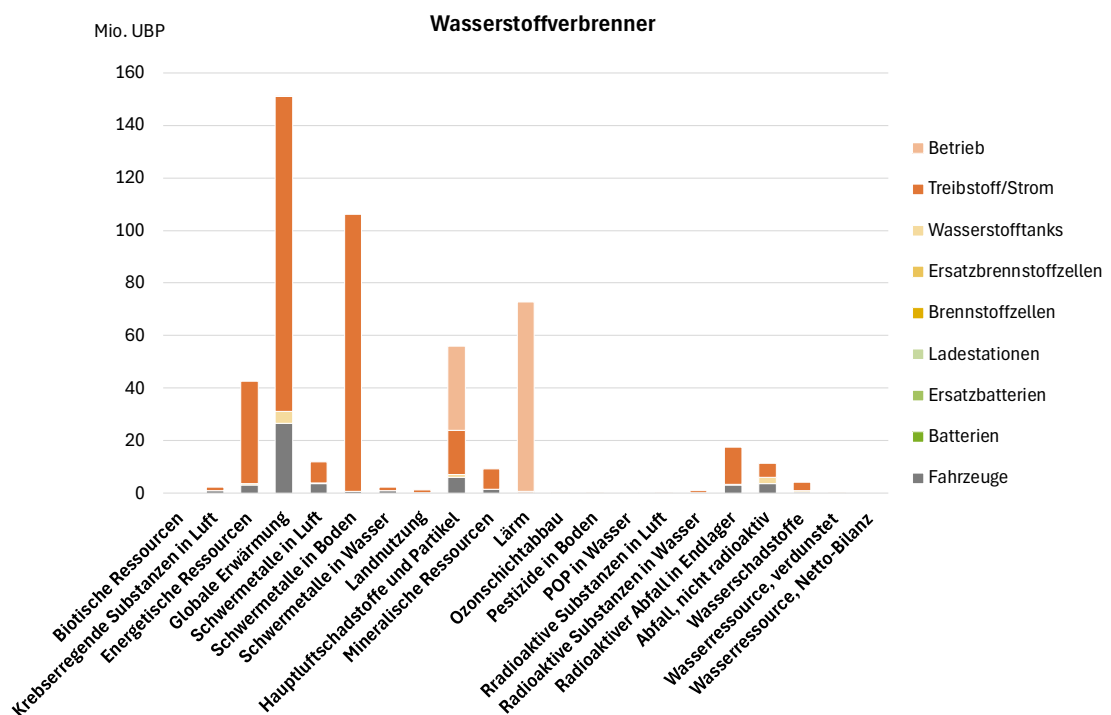


Grafik EcoExistence

Bei **Wasserstofffahrzeugen mit Verbrennungsmotor** ist die Treibstoffproduktion mit 66% der Gesamt-UBP die prägende Phase (Abbildung 16). Sie wird hauptsächlich durch die Klimawirkung (37%) und Schwermetallemissionen in den Boden (32%) bestimmt. Diese Schwermetallemissionen stammen fast ausschliesslich aus dem Stromtransport im Mittelspannungsnetz. Laut treeze 2014 (Itten et al. 2014) verursacht ein durchschnittlicher Kilometer des Mittelspannungsübertragungsnetz 5.3 kg Chrom-VI-Emissionen in den Boden. Diese Emission soll durch Auswaschung aus chrombehandelten Holzmasten entstehen. Es wird angenommen, dass etwa ein Drittel der Mittelspannungsleitungen Freilandleitungen sind. Aus dem Bericht geht nicht klar hervor, ob alle (rund 260'000) Masten als Holzmasten modelliert sind oder ob ein kleiner Teil (rund 2'500) als Stahlmasten abgebildet wurde. Die anderen zwei Drittel der Mittelspannungsleitungen werden als unterirdisch verlegt modelliert. Die gesamte Chrommenge im Holz basiert auf einer Studie von 1995, und, ohne Angabe von Referenzen, wird eine Auswaschung von 60% des gesamten Chroms angenommen. Die Unsicherheiten dieser Annahmen sind viel zu hoch, um den Beitrag dieser Einzelemission von 22% zum Gesamt-UBP als verlässlich zu betrachten.

Der Betrieb von **Wasserstoffverbrennern** in diesem Einsatz verursacht 21% der UBP. Davon entfallen 69% auf den Lärm der Busse und 31% auf die Hauptluftschadstoffe, die zu 99% aus PM10 bestehen, dass durch Reifen- und Bremsabrieb entsteht. Es ist wichtig zu erwähnen, dass diese PM-Emission (einschliesslich der Re-Emission von Staub auf der Strasse) mit sehr hoher Unsicherheit behaftet ist. Dies stellt einen potenziellen Fehler dar, der aber bei allen Fahrzeugen zu ähnlichen Verfälschungen der Ergebnisse führen könnte.

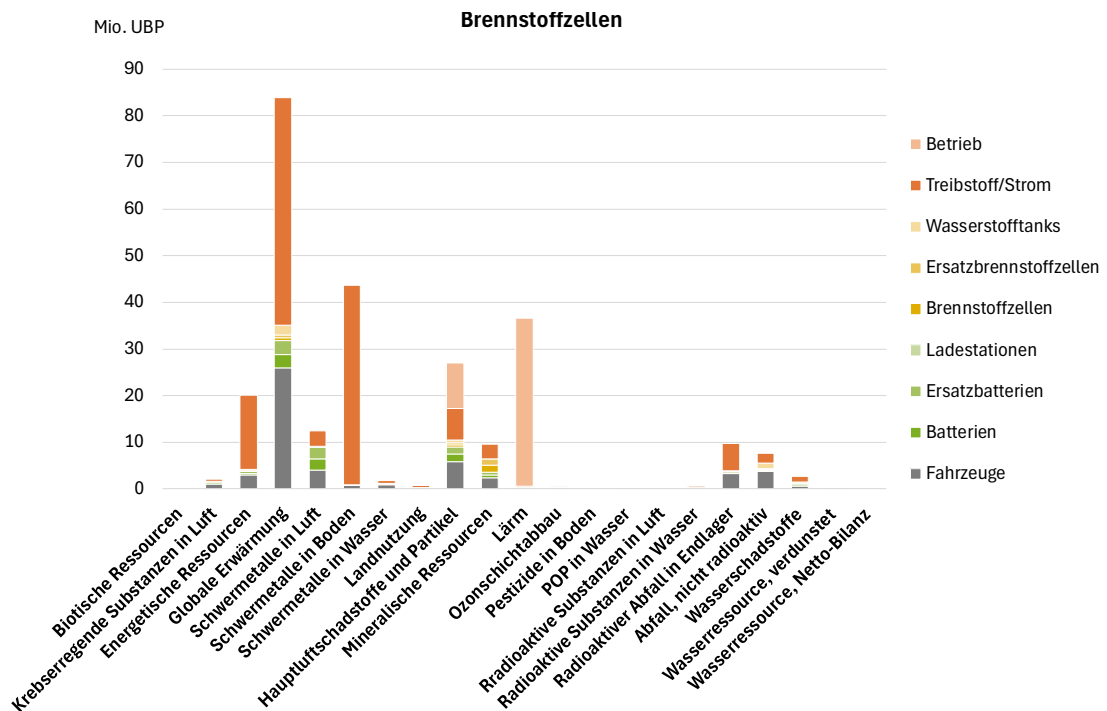
Abbildung 16: Beiträge der Umweltauswirkungen zu den gesamten UBP von Wasserstoffverbrennerbussen



Grafik EcoExistence

Brennstoffzellenfahrzeuge verursachen 51% ihrer Umweltbelastung durch die Treibstoffherstellung, während die Fahrzeugherstellung mit 31% einen erheblichen Beitrag leistet (Abbildung 17). Die Batterie (einschliesslich Ersatz) trägt mit 8% etwa doppelt so viel zum Gesamtergebnis bei wie die Brennstoffzellensysteme (einschliesslich Ersatz und Wasserstofftank). Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die UBP der Batterieproduktion mit einer hohen Unsicherheit behaftet sind. Weitere Einzelheiten finden Sie im folgenden Abschnitt zu Batteriefahrzeugen. Im Betrieb verursachen Brennstoffzellenbusse 18% ihrer gesamten Umweltbelastung: 21% davon durch Abriebemissionen und 69% durch Lärmemissionen. Beide Faktoren sind mit hoher Unsicherheit behaftet.

Abbildung 17: Beiträge der Umweltauswirkungen zu den gesamten UBP von Brennstoffzellenbussen



Grafik EcoExistence

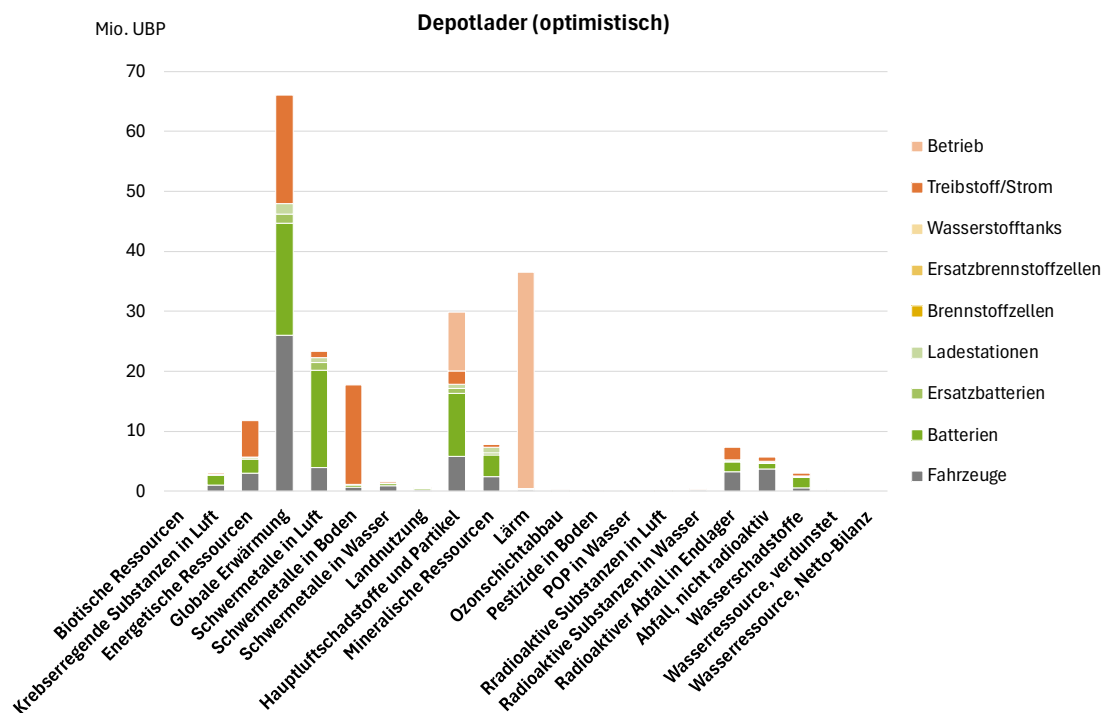
Bei **Batteriefahrzeugen** sind der direkte Betrieb und die Treibstoffherstellung (bzw. Stromerzeugung) mit 21% bzw. 22% zwar noch wichtig, aber nicht mehr dominierend (Abbildung 18). Die Fahrzeugherstellung dominiert mit 56% der gesamten UBP. Batterien (erste und Ersatzbatterien) sind zusammen für 30% der gesamten UBP verantwortlich. Ladestationen tragen nur 2% bei. Die UBP der Batterieherstellung werden hauptsächlich durch Treibhausgasemissionen (32%), Schwermetalle in der Luft (27%) und die Hauptluftschadstoffe (18%) bestimmt. Mineralische und energetische Ressourcen machen 6% bzw. 4% der UBP von Batterien aus. Der Betrieb (21% des Gesamtaufwands) wird hauptsächlich von Lärm (79% der UBP des Betriebs) und PM10 aus Abrieb (Reifen, Bremsen, Strasse; 21%) bestimmt.

Die Treibhausgasemissionen der Batterieherstellung, die etwa 9% der gesamten UBP ausmachen, stammen hauptsächlich aus der Energieversorgung des Produktionsprozesses. Diese Emissionen hängen stark von der angenommenen Zusammensetzung des Strommixes für die Produktion ab. Da es sich um zukünftige Produktionsprozesse handelt, sind die entsprechenden Annahmen naturgemäß mit erheblicher Unsicherheit behaftet. Der verwendete Datensatz geht von einem chinesischen Strommix für das Jahr 2024 aus, der bis 2030 deutlich weniger Treibhausgasemissionen pro kWh verursachen soll, wenn China seine offiziellen Klimaziele erreichen will.

Die Schwermetalle, die in die Luft emittiert werden (verantwortlich für 11% der gesamten UBP), stammen hauptsächlich aus der Kupferproduktion. Ihre Schätzungen in den Hintergrunddaten sind jedoch sehr ungenau und werden im Bericht zu den Hintergrunddaten als nicht zuverlässig eingestuft. Die Dokumentation dieser Daten weist explizit darauf hin, dass der entsprechende Datensatz verbessert werden muss, wenn diese Emissionen einen erheblichen Beitrag zu den LCA-Ergebnissen leisten. Leider ist dies im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Ähnliches gilt für die Hauptluftschadstoffe, die für 14% der UBP verantwortlich sind. Diese Kategorie wird von Abriebemissionen aus dem Betrieb und von SO₂- und PM-Emissionen der Kupfer-, Nickel-, Mangan- und Kobaltproduktion dominiert. Die Abriebemissionen sind sehr unsicher und die Emissionen der Metallproduktionen werden in den Hintergrunddaten nur grob geschätzt, wodurch die Ergebnisse entsprechend ungenau sind.

Abbildung 18: Beiträge der Umweltauswirkungen zu den gesamten UBP von Depotladerbussen



Das Bild für den Depotlader in der pessimistischen Variante sieht sehr ähnlich aus.

Grafik EcoExistence

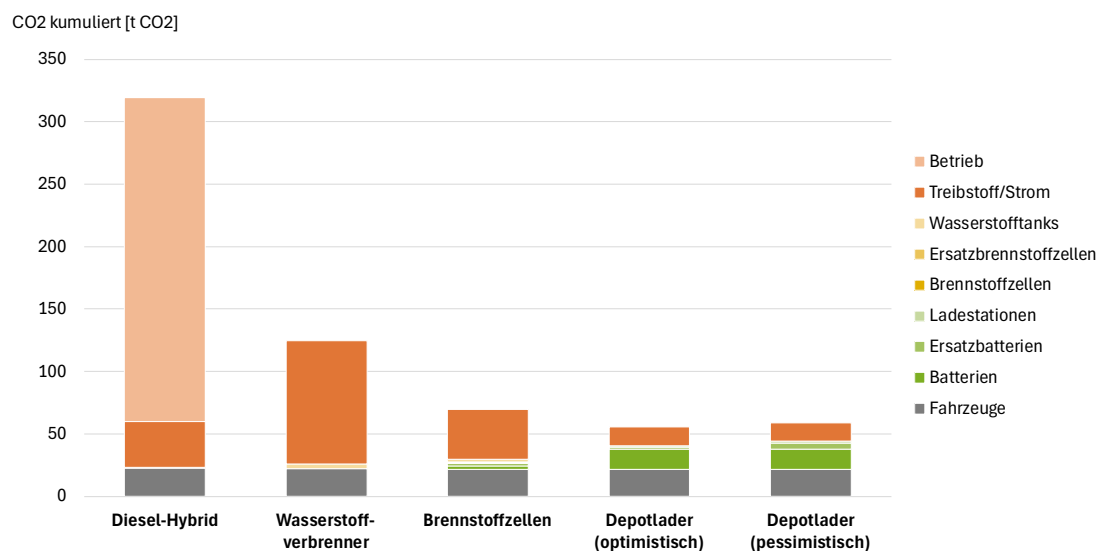
4.1.4. Direkte und kumulierte Emissionen

Die direkten Emissionen sind in den folgenden Abbildungen als Teil von den kumulierten Emissionen unter «Betrieb» dargestellt.

Direkte CO₂-Emissionen gibt es nur beim Dieselbus. Dieser weist auch die höchsten kumulierten Werte auf. Insgesamt zeigt sich ein Vergleich, den wir von den THG-Emissionen kennen (Abbildung 19).

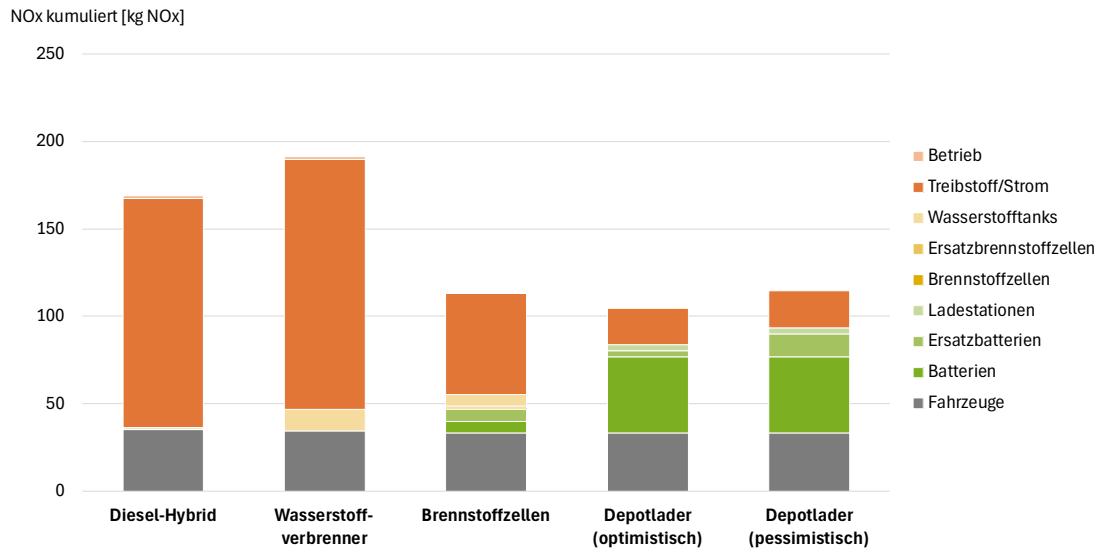
Die beiden Verbrennerbusse zeigen sehr geringe direkte NO_x-Emissionen, die Elektrobusse emittieren im Betrieb keine NO_x (Abbildung 20). Die indirekten NO_x-Emissionen in diesem Vergleich sind mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet. Die Emissionen stammen aus thermischen Prozessen in den Vorketten, also vor allem aus thermischen Kraftwerken und aus metallothermischen Prozessen. NO_x-Emissionen können in solchen Prozessen sehr effektiv reduziert werden. Die Quellen für die Verbreitung und Wirkung der Abgasbehandlung, die in den Hintergrunddaten der Metallproduktion und der Kraftwerkstechnologien genutzt wurden, sind teilweise über 30-jährig und es war im Rahmen dieser Studie nicht möglich zu untersuchen, wie gut die Annahmen der Hintergrunddaten noch zur heutigen Realität passen. Entsprechend ist es nicht möglich, die Unsicherheiten dieser Ergebnisse zu quantifizieren.

Abbildung 19: Technologievergleich: CO₂-Emission pro Jahr in OV_SB_HVZ-V



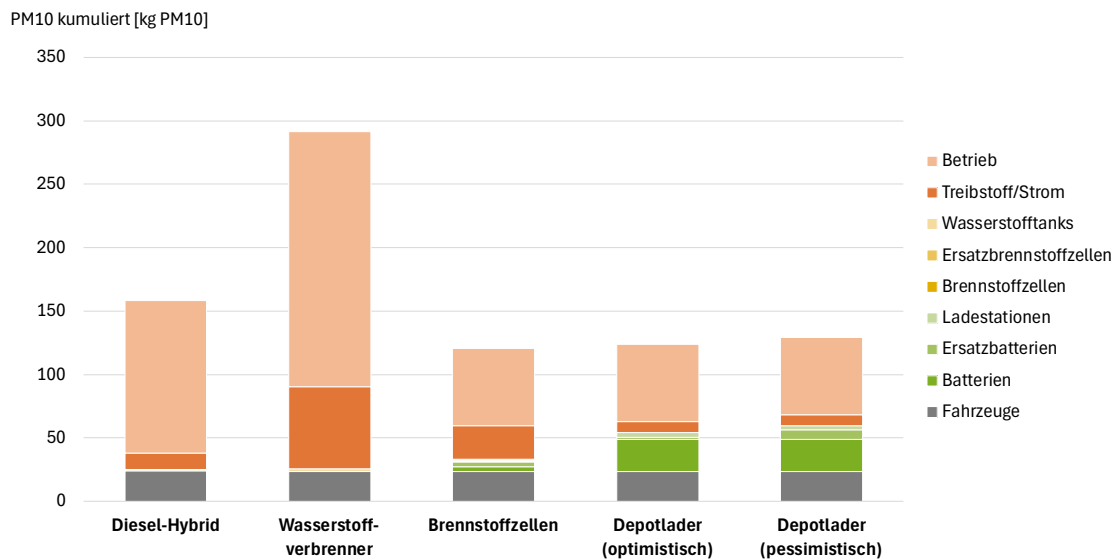
Grafik EcoExistence

Abbildung 20: Technologievergleich: NO_x-Emission pro Jahr in OV_SB_HVZ-V



Grafik EcoExistence

Abbildung 21: Technologievergleich: PM₁₀-Emission pro Jahr in OV_SB_HVZ-V



Grafik EcoExistence

Die PM₁₀-Emissionen stammen zu einem beträchtlichen Teil aus dem Betrieb (Abbildung 21). Diese direkten Emissionen stammen bei allen Technologien praktisch ausschliesslich aus Abrieb von Reifen, Bremsen und Strasse sowie aus der Aufwirbelung von Staub, der sich auf der Strasse gesetzt hat. Diese Emissionen stammen aus HBEFA 5.1 und sind mit Unsicherheiten

behaftet. Sie werden unter Berücksichtigung von Fahrzeugmasse und Fahrprofilen modelliert. Das Modell berücksichtigt auch, dass Elektrofahrzeuge und Hybride dank der Rekuperation weniger mechanisch bremsen als reine Verbrennerfahrzeuge und darum weniger Bremsabrieb verursachen. Dies ist der Grund, warum die Wasserstoffverbrenner in dieser Studie deutlich höhere direkte PM₁₀ Emissionen verursachen als die anderen. Hybridbusse können aufgrund der kleinen Batterie weniger rekuperieren als Brennstoffzellen- und Batteriebusse und verursachen darum mehr PM-Emissionen als letztere. Während die absolute Höhe dieser direkten Emissionen recht unsicher ist, entsprechen die Unterschiede in den direkten Emissionen zwischen den Technologien wahrscheinlich der Realität.

Die indirekten PM-10 Emissionen stammen sowohl aus Verbrennungsprozessen als auch aus mechanischem Abrieb, zum Beispiel beim Abbau von Rohstoffen oder bei Transporten. Sie sind insgesamt mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet, sodass es nicht klar ist, ob die in Abbildung 21 gezeigten Unterschiede signifikant sind oder nicht.

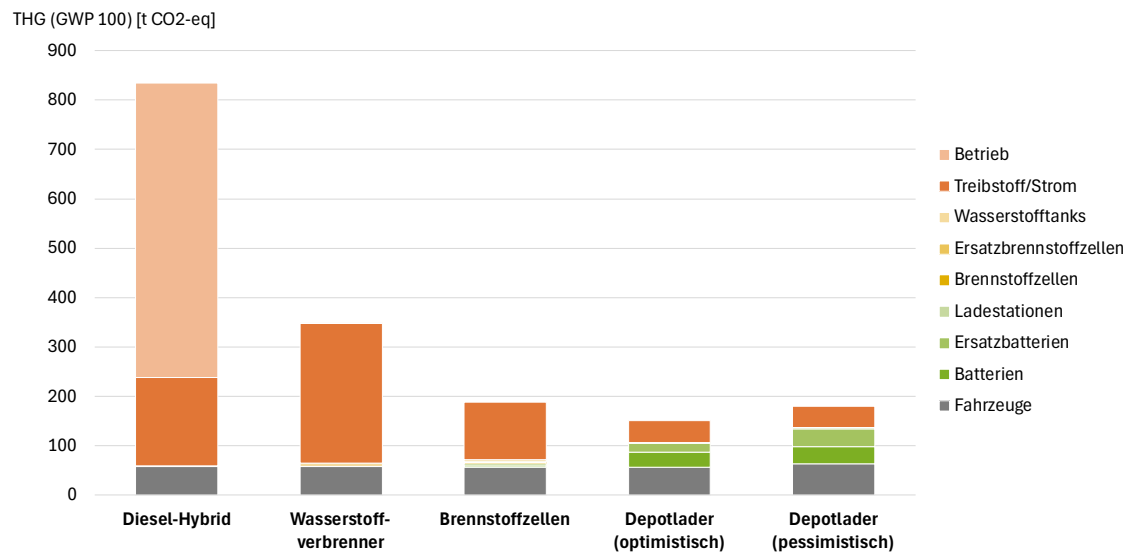
4.2. Gelenkbus in Orts-/Agglomerationslinie, integral

In diesem Einsatzprofil könnte die Verwendung von Depotlader-Batteriebusen zwischen 2030 und 2036 dazu führen, dass statt der 8 Diesel- oder Wasserstoffbusen 10 Batteriebusse benötigt werden. Diese Variante betrachten wir im Szenario mit der langsamen Verbesserung der Batterieeigenschaften. Sollten sich die Batterien jedoch schneller verbessern, werden bereits im Jahr 2030 Batterie-Depotlader am Markt sein, die auch diesen Einsatz mit nur 8 Bussen ermöglichen. Aufgrund der zusätzlichen Fahrzeuge und Fahrten, die für den Ladevorgang der Busse erforderlich sind, verursacht der Betrieb dieser Linie im langsamen Entwicklungsszenario etwas höhere Umweltbelastungen als im raschen Entwicklungsszenario.

4.2.1. Treibhausgasemissionen

Abbildung 22 zeigt, abgesehen von der absoluten Höhe der Emissionen, ein insgesamt ähnliches Bild wie Abbildung 12 für die Orts-/Agglomerationslinie mit Standardbus und HVZ-Verstärker. Auch bei diesem Einsatz verursachen Batteriebusse weniger Treibhausgasemissionen als Brennstoffzellenbusse. Im Szenario der langsamen Verbesserung der Batterien, in dem zwei zusätzliche Fahrzeuge benötigt werden, liegen die Treibhausgasemissionen 20% höher als im Szenario mit rascher Verbesserung und somit nur unbedeutend tiefer als mit dem Betrieb von Brennstoffzellenbussen. Wasserstoffverbrennerbusse verursachen auch in diesem Einsatz weniger Treibhausgasemissionen als Dieselbusse, sind aber den Elektrobussen klar unterlegen.

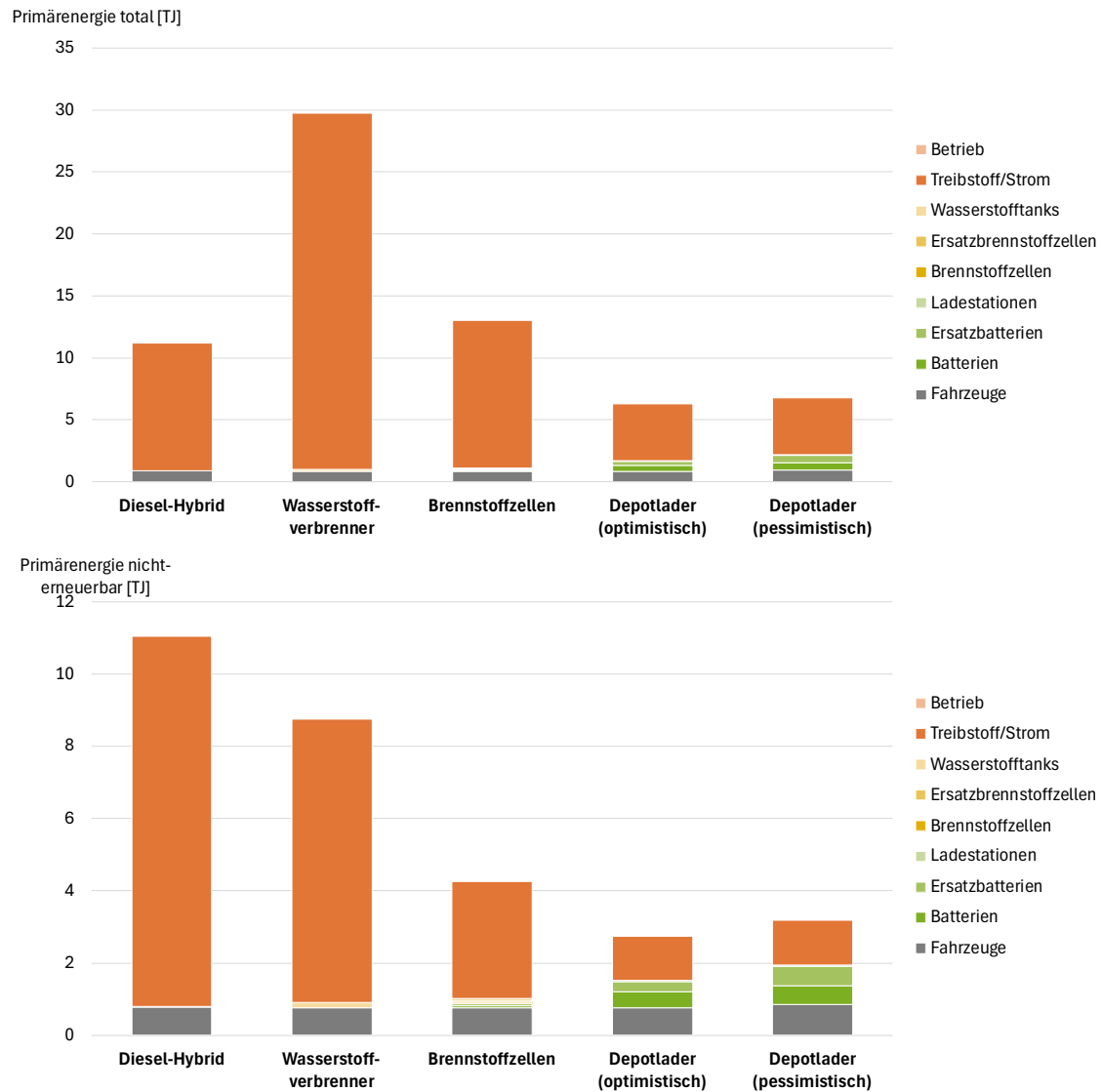
Abbildung 22: Technologievergleich: Treibhausgasemissionen pro Jahr in OV_GB_Int



Grafik EcoExistence

4.2.2. Primärenergiebedarf

Abbildung 23: Technologievergleich: Primärenergiebedarf pro Jahr in OV_GB_Int



Grafik EcoExistence

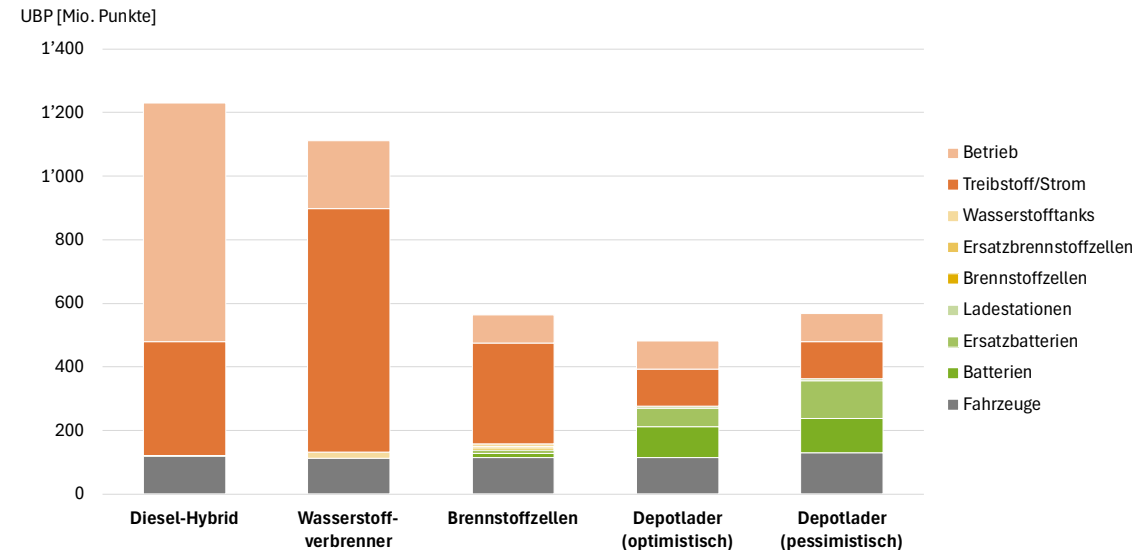
Dieses Einsatzprofil (Abbildung 23) zeigt ein ähnliches Bild wie OV_SB_HEV-V in Bezug auf den Primärenergiebedarf. Batteriebusse sind hinsichtlich dieser Wirkungsindikatoren die klare erste Wahl. Wasserstoffverbrennerbusse und Brennstoffzellenbusse benötigen aufgrund ihres niedrigeren Gesamtwirkungsgrades mehr Primärenergie als Diesel-Hybridbusse.

Betrachtet man nur den nicht erneuerbaren Teil des Primärenergiebedarfs, so führt der Einsatz von Dieselmotoren zu den höchsten Ergebnissen. Obwohl ein erheblicher Teil des Stroms, der für die Wasserstoffherstellung verwendet wird, aus erneuerbaren Quellen stammt, ist der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf dieses Profils beim Einsatz von Wasserstoffverbrennerbussen immer noch sehr hoch.

4.2.3. Umweltbelastungspunkte

Auch bei UBP zeigt der Technologievergleich im Einsatz von Gelenkbussen im Orts-/Agglomerationsverkehr ähnliche Ergebnisse wie bei Standardbussen mit HVZ-Verstärkung (Abbildung 24). Bei rascher Batterieentwicklung schneiden die Depotlader auch bezüglich UBP am besten ab. Bei langsamer Batterieentwicklung schneiden Depotlader und Brennstoffzellenfahrzeuge in diesem Einsatzprofil praktisch gleich ab. Die Beiträge einzelner Komponenten und Phasen sind ebenfalls vergleichbar mit dem Einsatzprofil O_SB_HVZ-V. Weitere Informationen finden Sie in der Diskussion in Kapitel 4.1.3.

Abbildung 24: Technologievergleich: Umweltbelastungspunkte pro Jahr in OV_GB_Int



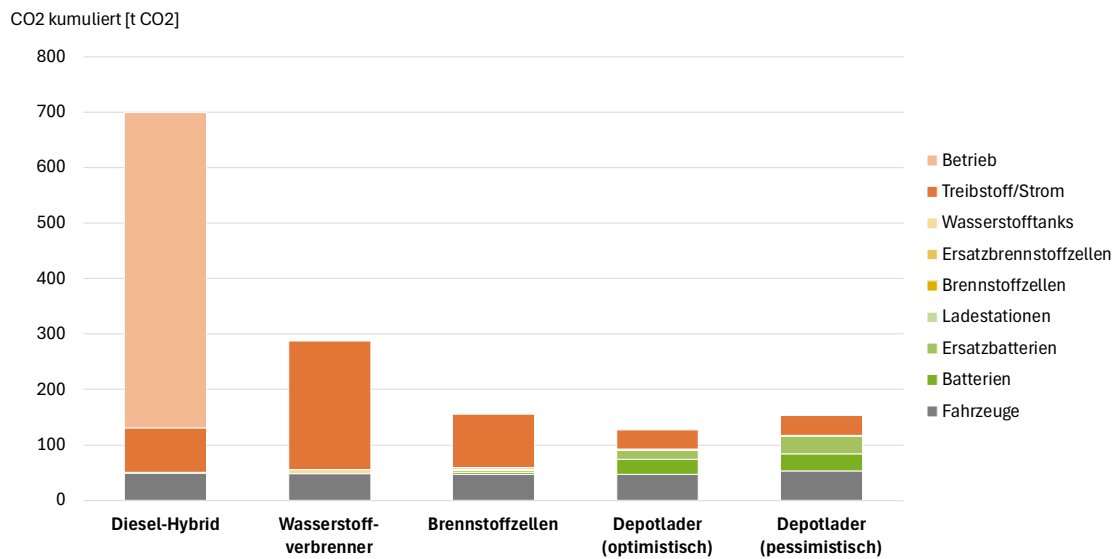
Grafik EcoExistence

4.2.4. Direkte und kumulierte Emissionen

Die direkten und kumulierten Emissionen sind in Abbildung 25, Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellt. Sie zeigen für alle Einsatzprofile ein sehr ähnliches Bild. Darum wird hier auf die Diskussion in Kapitel 4.1.4 verwiesen. Hier sei nur noch einmal darauf hingewiesen, dass insbesondere die indirekten NO_x- und PM₁₀-Emissionen mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet

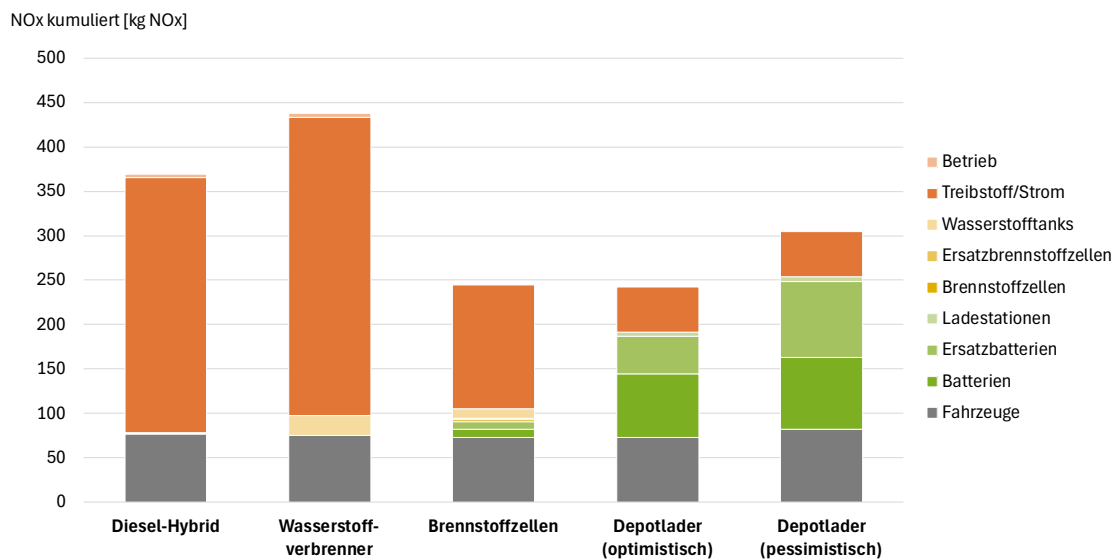
sind und dass darum nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Unterschiede zwischen den Depotlader- und Brennstoffzellenbussen signifikant sind.

Abbildung 25: Technologievergleich: CO₂-Emission pro Jahr in OV_GB_Int



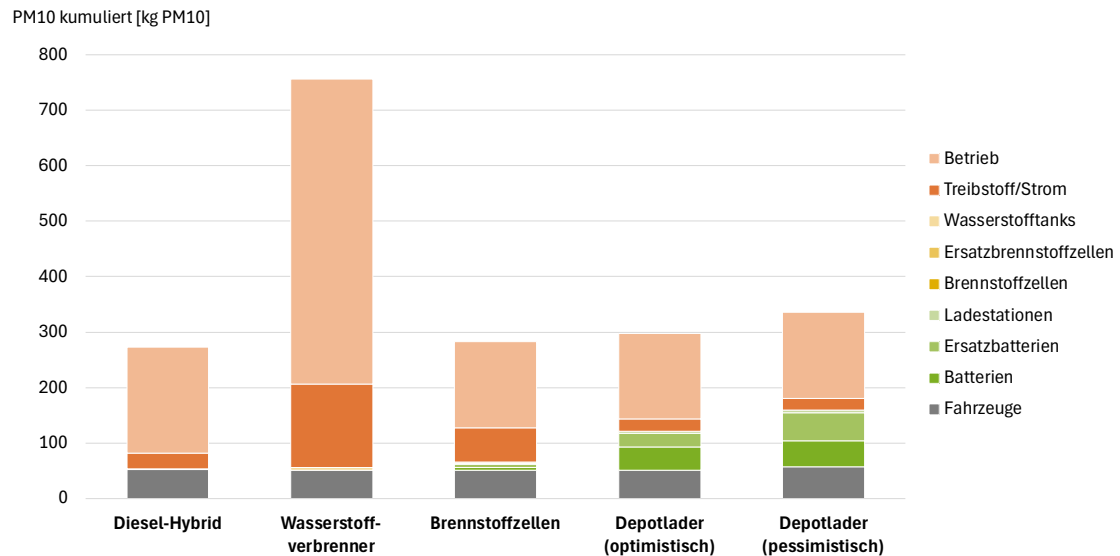
Grafik EcoExistence

Abbildung 26: Technologievergleich: NO_x-Emission pro Jahr in OV_GB_Int



Grafik EcoExistence

Abbildung 27: Technologievergleich: PM10-Emission pro Jahr in OV_GB_Int



Grafik EcoExistence

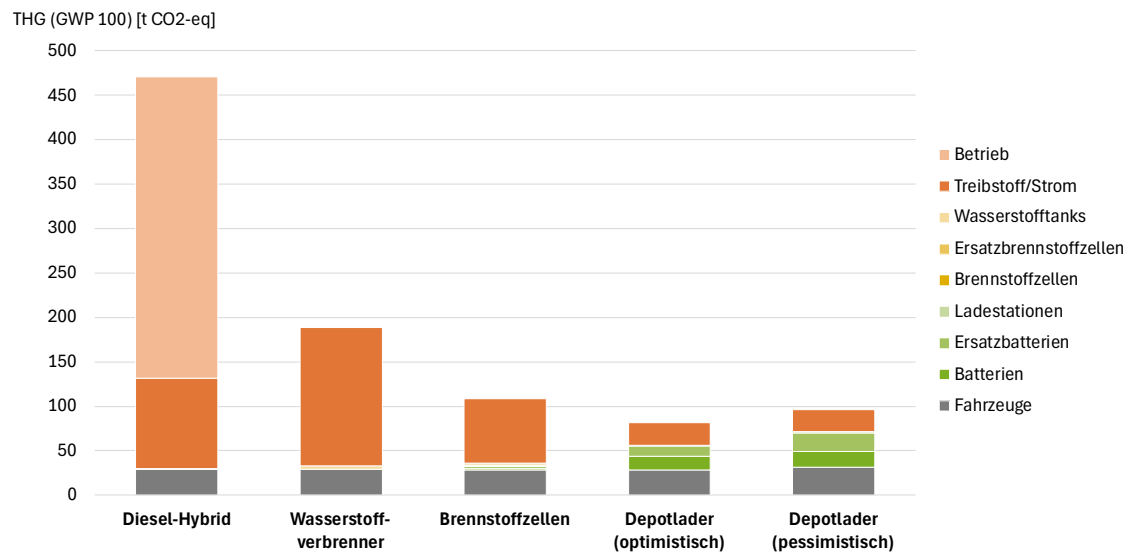
4.3. Gelenkbus in Mittelland-Regionallinie, integral

Ähnlich wie bei den Gelenkbussen im Orts-/Agglomerationsverkehr führt auch bei diesem Einsatz eine Nutzung von Batteriebussen im Szenario mit der langsamen Batterieentwicklung zu einem zusätzlichen Fahrzeugbedarf. Der spezifische Energiebedarf der Gelenkbusse ist höher als derjenige von Standardbussen. Im Vergleich zur Orts-/Agglomerationslinie, die ebenfalls mit dem Gelenkbus bedient wird, ist der spezifische Energiebedarf aber tiefer, weil im Regionalverkehr flüssiger gefahren wird. Bei Einsätzen mit höherem Energiebedarf wird die Effizienz der Fahrzeuge für die Ökobilanzresultate wichtiger. Entsprechend werden in diesen Fällen die Batteriebusse, die bei weitem die effizientesten Fahrzeuge im Vergleich sind, noch vorteilhafter abschneiden als auf den Linien mit tieferem spezifischen Verbrauch.

4.3.1. Treibhausgasemissionen

Grundsätzlich zeigt sich auch auf dieser Linie ein ähnlicher Vergleich wie auf den Orts-/Agglomerationslinien (Abbildung 28). Wie oben erläutert, schneiden die beiden Batteriebusvarianten hier leicht besser ab als die Brennstoffzellenbusse. Auch hier erweisen sich Wasserstoffverbrennerbusse nicht als klimafreundlichere Option als Elektrobusse.

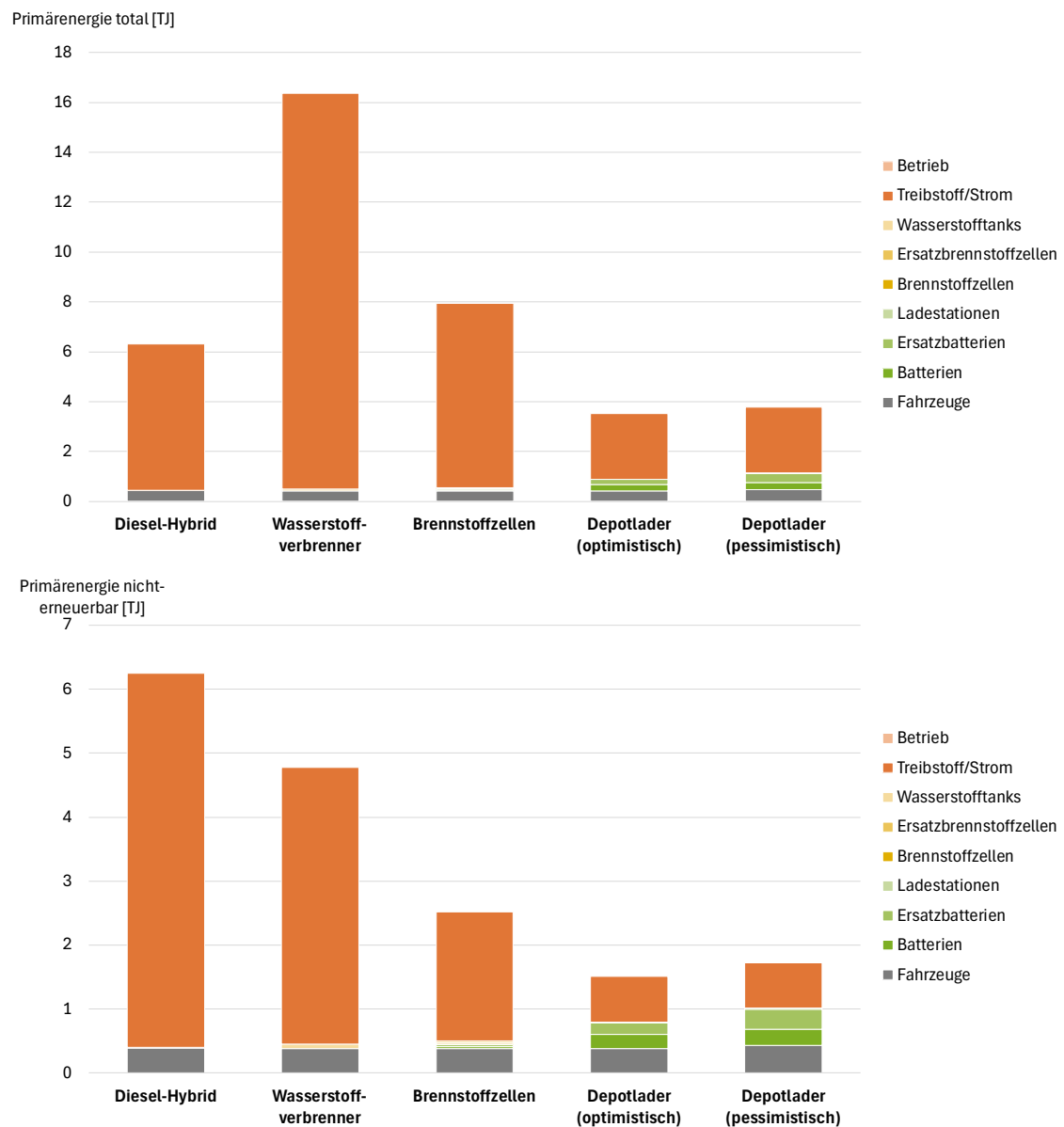
Abbildung 28: Technologievergleich: Treibhausgasemissionen pro Jahr in RV-M_GB_Int



Grafik EcoExistence

4.3.2. Primärenergiebedarf

Abbildung 29: Technologievergleich: Primärenergiebedarf pro Jahr in RV-M_GB_Int



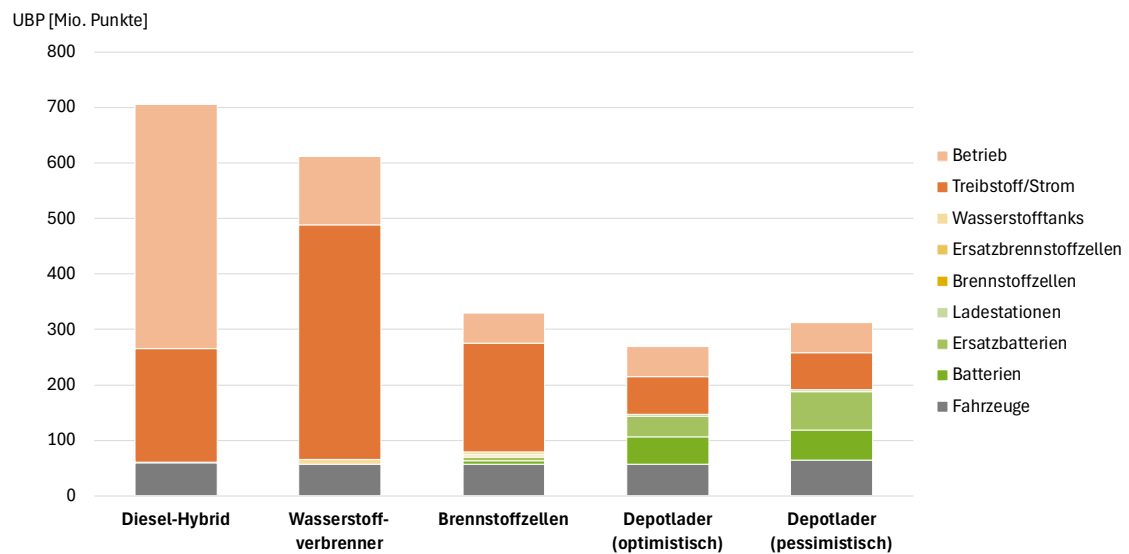
Grafik EcoExistence

Die Ergebnisse für den Primärenergieverbrauch ähneln denen der Linien im Orts-/Agglomerationsverkehr (Abbildung 29).

4.3.3. Umweltbelastungspunkte

Die Ergebnisse für UBP ähneln denen der Linien im Orts-/Agglomerationsverkehr (Abbildung 30). Die Umweltbelastungen der einzelnen Phasen werden in Kapitel 4.1.3. erläutert.

Abbildung 30: Technologievergleich: Umweltbelastungspunkte pro Jahr in RV-M_GB_Int

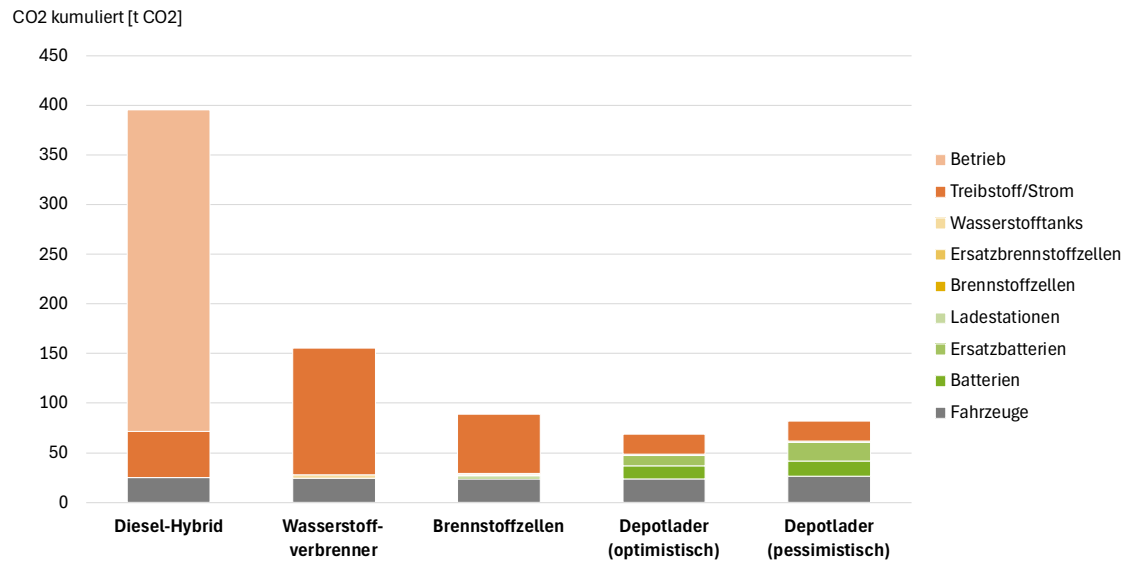


Grafik EcoExistence

4.3.4. Direkte und kumulierte Emissionen

Die direkten und kumulierten Emissionen sind in Abbildung 31, Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt. Sie zeigen für alle Einsatzprofile ein sehr ähnliches Bild. Darum wird hier auf die Diskussion in Kapitel 4.1.4 verwiesen. Hier sei nur noch einmal darauf hingewiesen, dass insbesondere die indirekten NO_x- und PM10-Emissionen mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet ist und dass darum nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Unterschiede zwischen den Depotlader- und den Brennstoffzellenbussen signifikant sind.

Abbildung 31: Technologievergleich: CO₂-Emission pro Jahr in RV-M_GB_Int



Grafik EcoExistence

Abbildung 32: Technologievergleich: NO_x-Emission pro Jahr in RV-M_GB_Int



Grafik EcoExistence

Abbildung 33: Technologievergleich: PM10-Emission pro Jahr in RV-M_GB_Int



Grafik EcoExistence

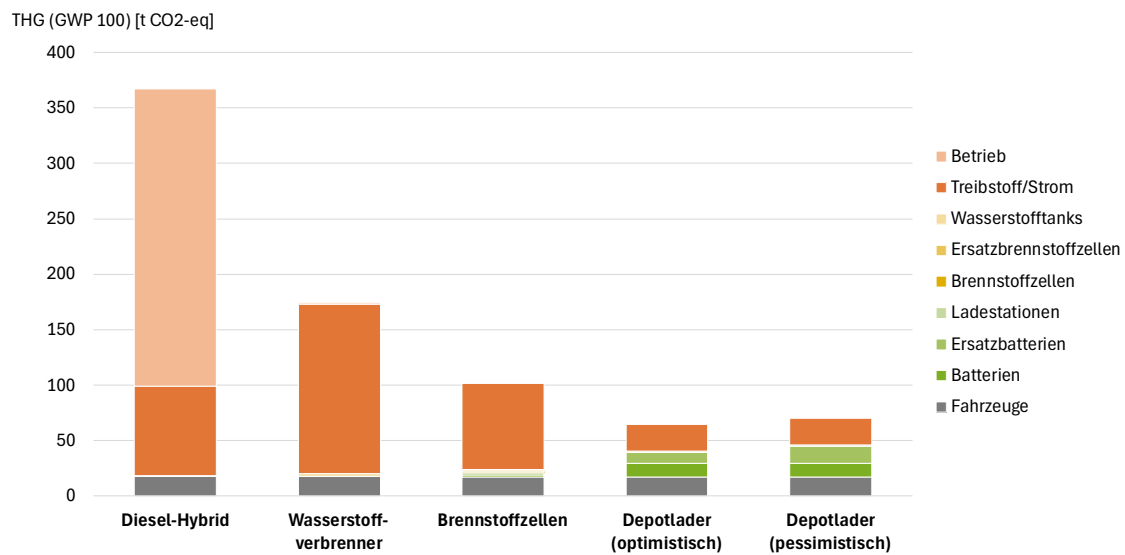
4.4. Standardbus in Berggebiets-Regionallinie, integral

Dieser Einsatz zeigt erneut keine Unterschiede zwischen den Szenarien mit rascher und langsamer Batterieentwicklung, da bereits bei einer langsamen Entwicklung die Batterien im Jahr 2030 eine ausreichende Reichweite bieten werden. Ansonsten ähnelt der Vergleich demjenigen der Mittelland-Regionallinie.

4.4.1. Treibhausgasemissionen

Batteriebusse sind deutlich energieeffizienter als andere Technologien, was zu deutlich geringeren Treibhausgasemissionen führt (Abbildung 34). Wasserstoffverbrennerbusse tragen im Vergleich zu Brennstoffzellenbussen deutlich stärker zum Klimawandel bei, während Diesel-Hybride die schlechteste Option in Bezug auf diese Umweltauswirkungen darstellen.

Abbildung 34: Technologievergleich: Treibhausgasemissionen pro Jahr in RV-B_SB_Int

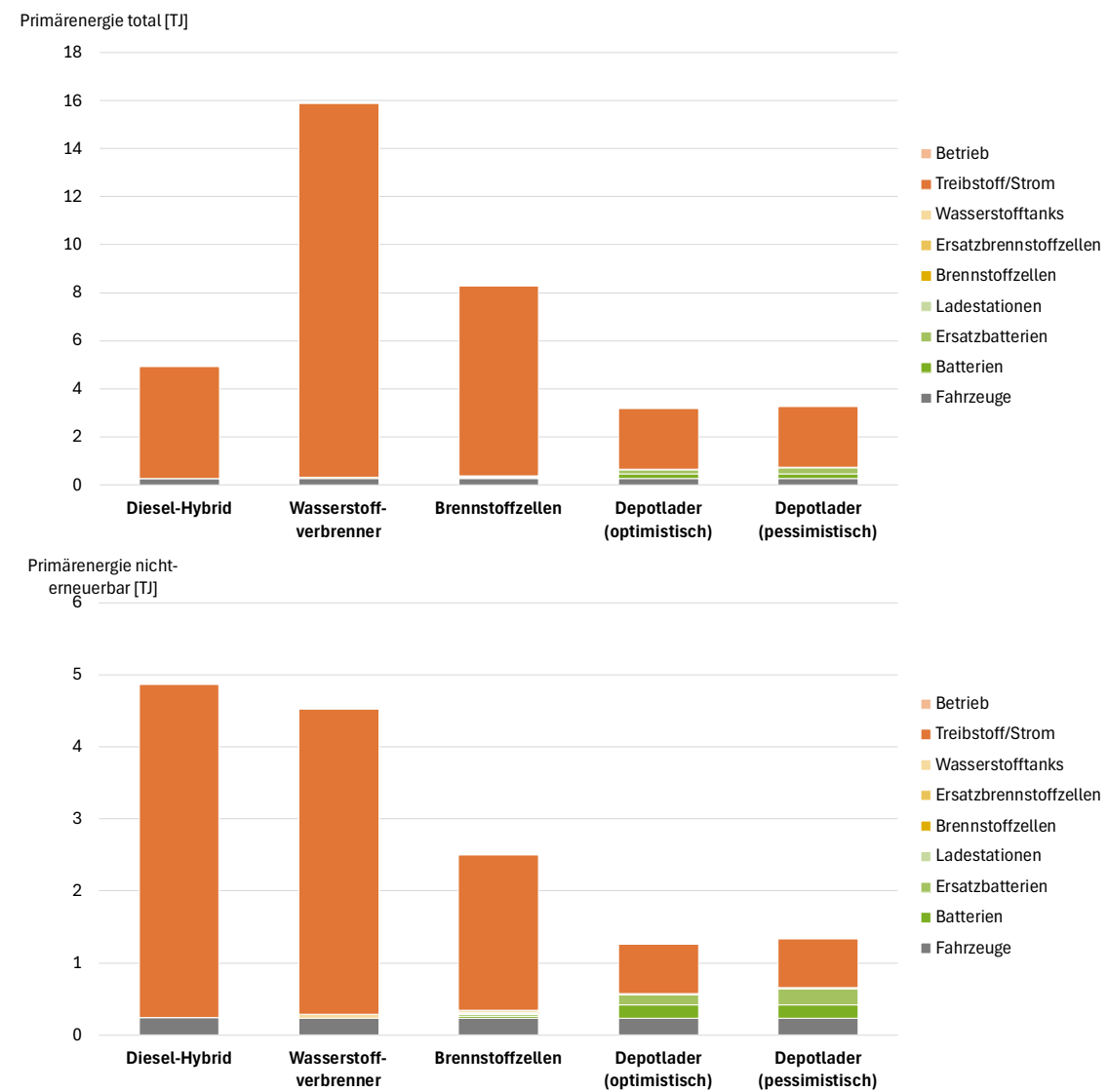


Grafik EcoExistence

4.4.2. Primärenergiebedarf

Wie in allen bisher besprochenen Anwendungsfällen zeigen Batteriebusse den niedrigsten Primärenergiebedarf (Abbildung 35). Wasserstoffbusse hingegen weisen aufgrund ihrer geringen Gesamteffizienz den höchsten Primärenergiebedarf auf. Betrachtet man nur den nicht erneuerbaren Teil der Primärenergie, so schneidet der Dieselbus schlechter ab als der Wasserstoffverbrenner.

Abbildung 35: Technologievergleich: Primärenergiebedarf pro Jahr in RV-B_SB_Int

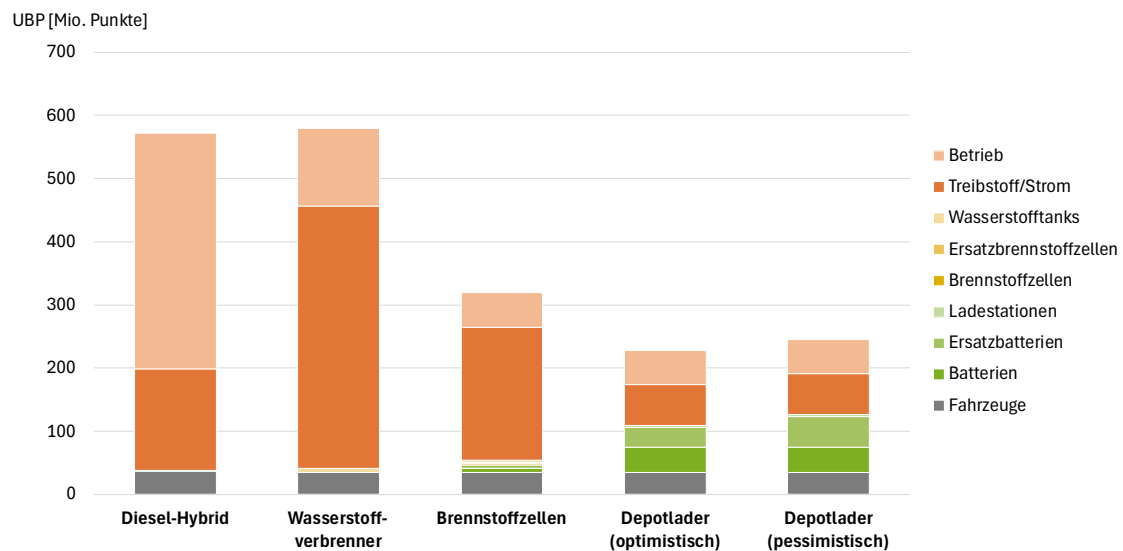


Grafik EcoExistence

4.4.3. Umweltbelastungspunkte

Die Ergebnisse für UBP ähneln auch denen der zuvor besprochenen Linien (Abbildung 36). Batteriebusse schneiden in Bezug auf diesen Indikator im Vergleich zu Brennstoffzellenbussen um etwa 30% (pessimistisch) 40% (optimistisch) besser ab. Die Umweltbelastungen der einzelnen Phasen werden in Kapitel 4.1.3. erläutert. In diesem Einsatz verursachen Wasserstoffverbrennerbusse sogar eine geringfügig höhere Umweltbelastung als Diesel-Hybridbusse. Grund dafür ist, dass in diesem Fahrprofil beim Diesel-Hybrid die Bremsenergie rekuperiert werden kann und so ein viel kleinerer Energiebedarf resultiert als beim Wasserstoffverbrenner, der keine Rekuperation zulässt. Bei den anderen Fahrprofilen spielt die Rekuperation eine viel weniger wichtige Rolle als im Berggebiet.

Abbildung 36: Technologievergleich: Umweltbelastungspunkte pro Jahr in RV-B_SB_Int

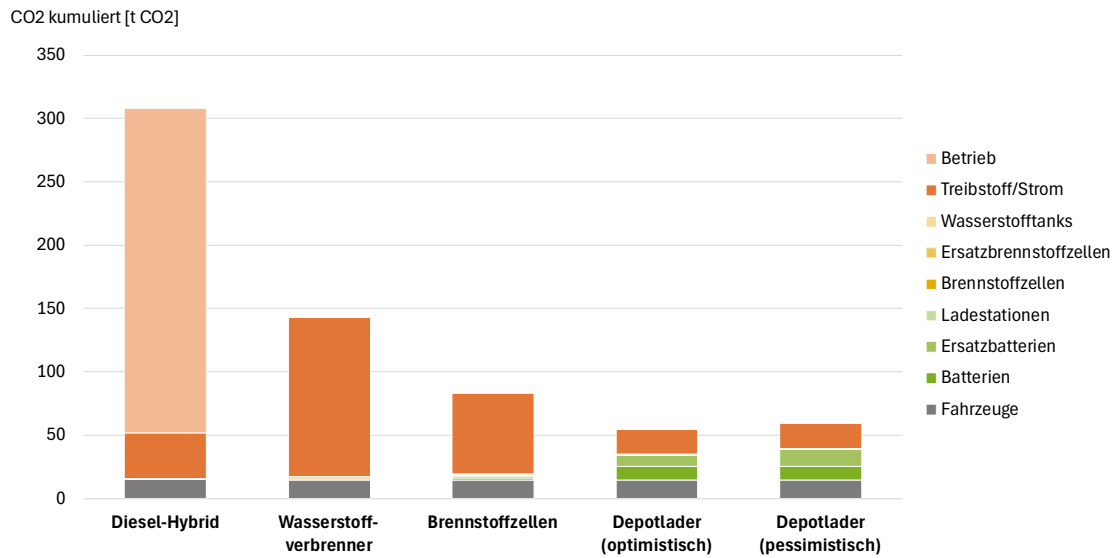


Grafik EcoExistence

4.4.4. Direkte und kumulierte Emissionen

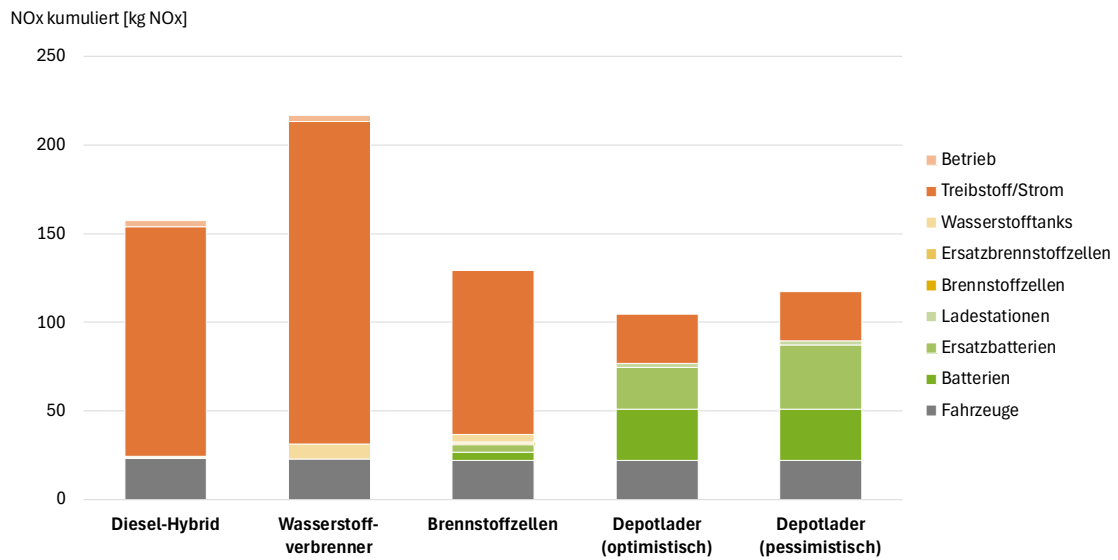
Die direkten und kumulierten Emissionen sind in Abbildung 37, Abbildung 38 und Abbildung 39 dargestellt. Sie zeigen für alle Einsatzprofile ein sehr ähnliches Bild. Darum wird hier auf die Diskussion in Kapitel 4.1.4 verwiesen. Hier sei nur noch einmal darauf hingewiesen, dass insbesondere die indirekten NO_x - und PM_{10} -Emissionen mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet ist und dass darum nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Unterschiede zwischen Depotlader- und Brennstoffzellenbussen signifikant sind.

Abbildung 37: Technologievergleich: CO₂-Emission pro Jahr in RV-B_SB_Int

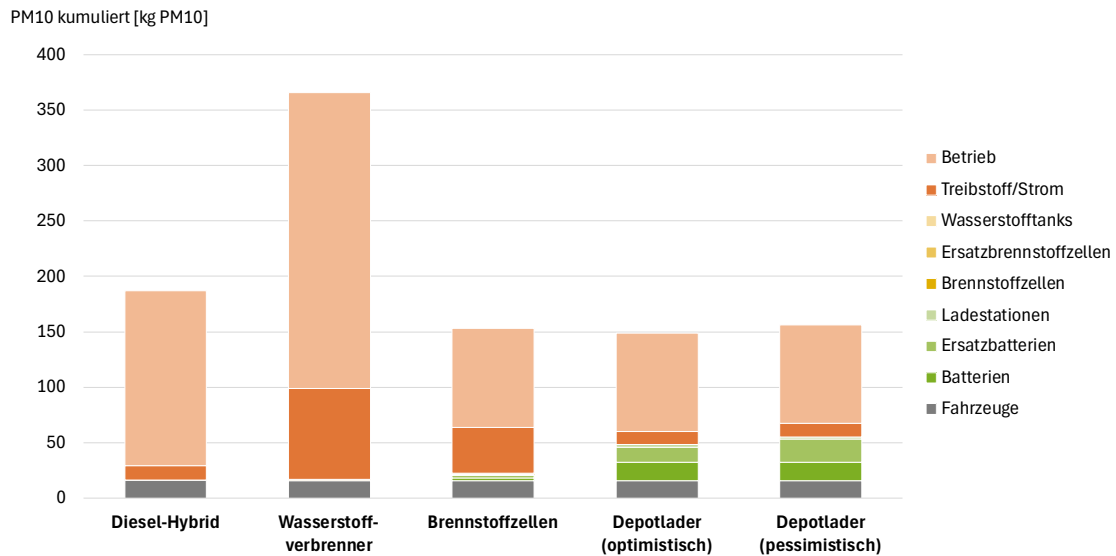


Grafik EcoExistence

Abbildung 38: Technologievergleich: NO_x-Emission pro Jahr in RV-B_SB_Int



Grafik EcoExistence

Abbildung 39: Technologievergleich: PM10-Emission pro Jahr in RV-B_SB_Int

Grafik EcoExistence

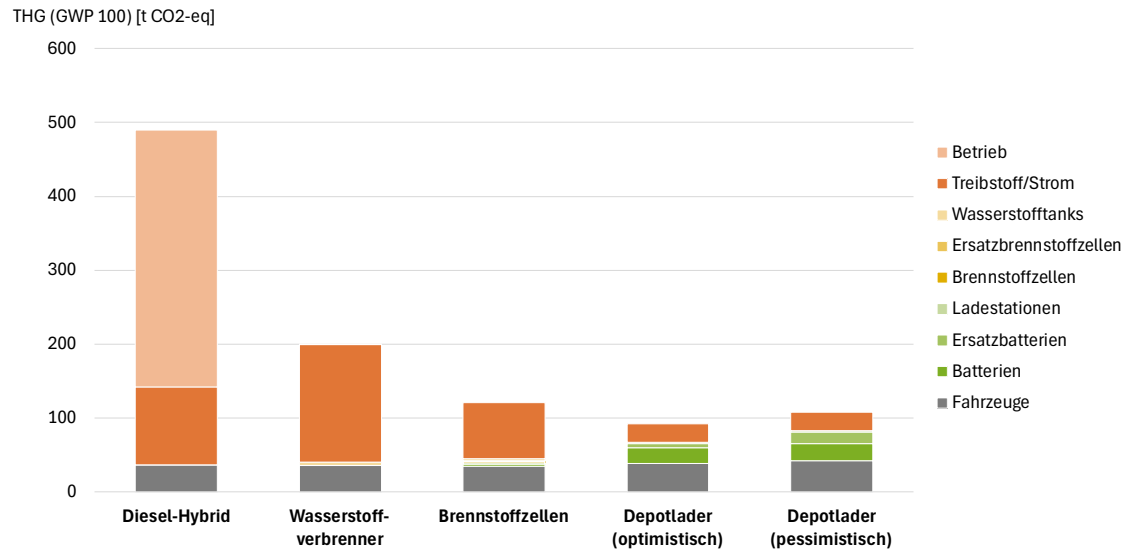
4.5. Gelenkbus in Bahnersatz

Einsätze im Bahnersatz können lange Tagesdistanzen bei hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten erfordern. Das bedeutet einen hohen spezifischen Energiebedarf und damit kürzere Reichweiten pro Ladung bei Batteriebussen. Daher werden für solche Einsätze mehr Batteriebusse benötigt als Busse mit anderen Antrieben. Selbst nach dem Ersatz der ersten Batterie im Jahr 2036 wird dies im Szenario mit einer langsamen Batterieentwicklung noch der Fall sein. Andererseits wirkt sich die sehr hohe Gesamtenergieeffizienz von Batteriebussen besonders positiv auf deren Ökobilanzergebnisse im Vergleich zu anderen Antrieben aus.

4.5.1. Treibhausgasemissionen

Batteriebusse sind, auch im Bahnersatz, trotz des Mehrbedarfs an Fahrzeugen und den damit verbundenen Umweltauswirkungen die klimafreundlichste Antriebstechnologie für Tagesdistanzen von bis zu 500 km (Abbildung 40). Brennstoffzellenfahrzeuge sind über 30% schlechter. Wasserstoffverbrenner und Diesel-Hybridbusse sind aus Klimasicht deutlich schlechtere Alternativen.

Abbildung 40: Technologievergleich: Treibhausgasemissionen pro Jahr in Bahners_GB

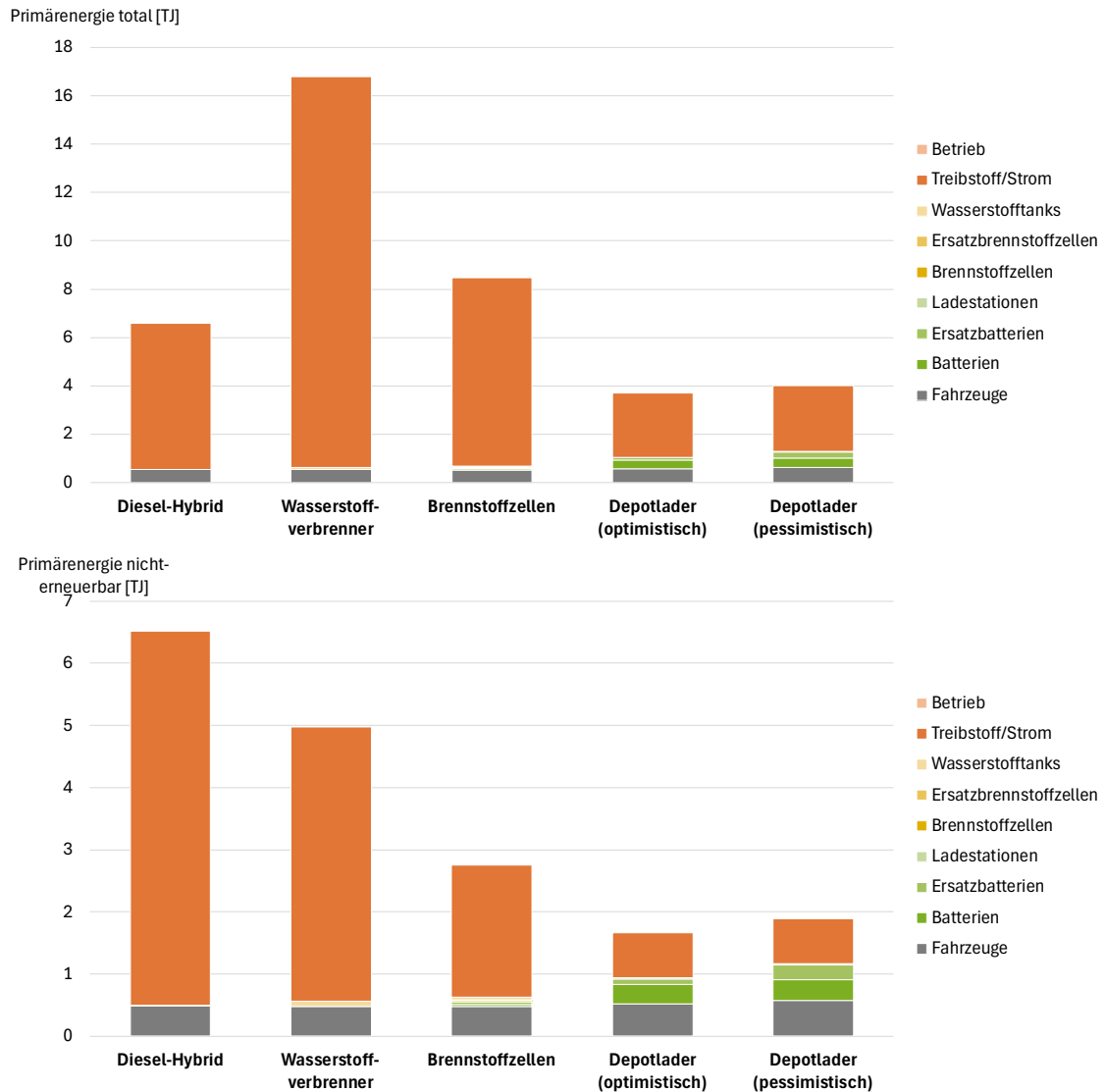


Grafik EcoExistence

4.5.2. Primärenergiebedarf

Auch in dieser Anwendung zeigt sich der bekannte Vergleich des Primärenergiebedarfs verschiedener Technologien (Abbildung 41). Batteriebusse benötigen deutlich weniger Primärenergie als Diesel-Hybridbusse, während Wasserstoffbusse den höchsten Energiebedarf aufweisen. Konzentriert man sich jedoch auf nicht erneuerbare Energie, so ändert sich die Reihenfolge zwischen Diesel- und Wasserstoffbussen.

Abbildung 41: Technologievergleich: Primärenergiebedarf pro Jahr in Bahners_GB



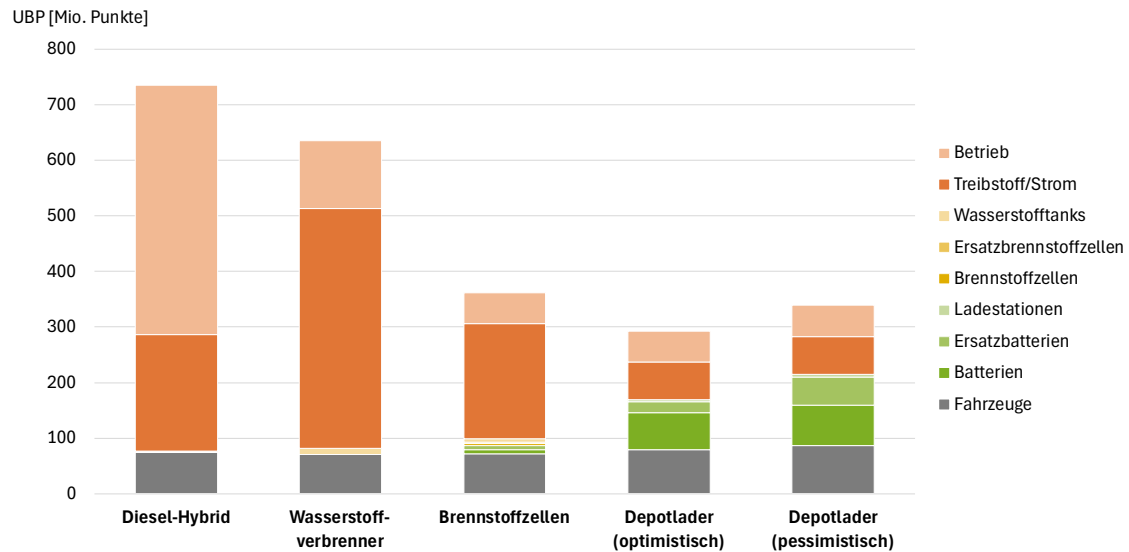
Grafik EcoExistence

4.5.3. Umweltbelastungspunkte

Bezüglich UBP zeigt der Technologievergleich bei einem Einsatz von Gelenkbussen im Bahnersatzverkehr bis 500 km Tagesdistanz ähnliche Ergebnisse (Abbildung 42) wie bei einem Einsatz von Standard- oder Gelenkbussen im Ortsverkehr. Batteriebusse schneiden in diesem Einsatzprofil erneut besser ab als Brennstoffzellenfahrzeuge. Wasserstoffverbrenner sind auch hier keine umweltfreundliche Alternative. Die Beiträge von einzelnen Komponenten bzw. Phasen

sind ebenfalls vergleichbar mit dem Einsatzprofil O_SB_HVZ-V. Weitere Informationen finden Sie in Kapitel 4.1.3.

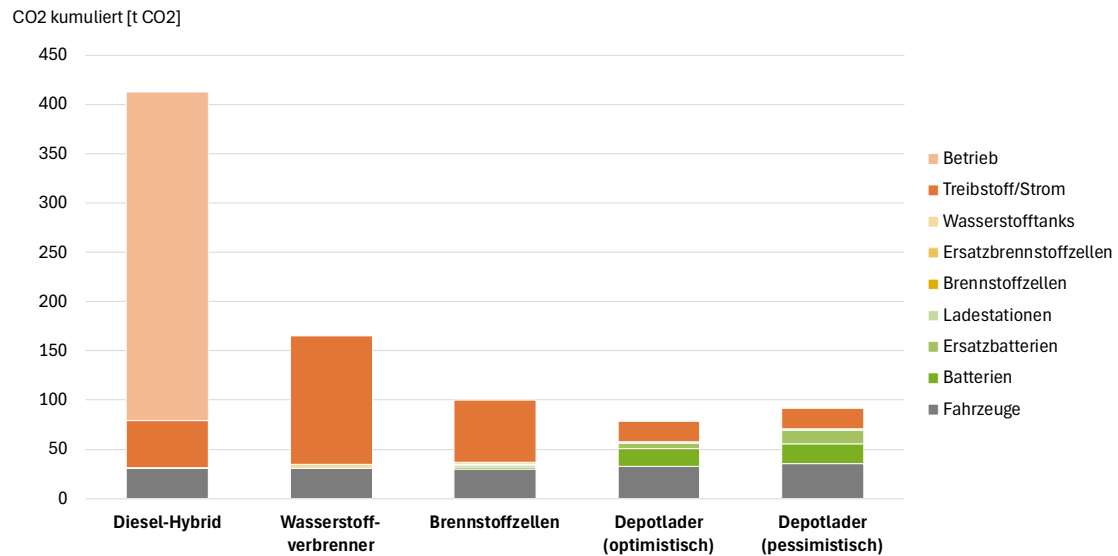
Abbildung 42: Technologievergleich: Umweltbelastungspunkte pro Jahr in Bahners_GB



Grafik EcoExistence

4.5.4. Direkte und kumulierte Emissionen

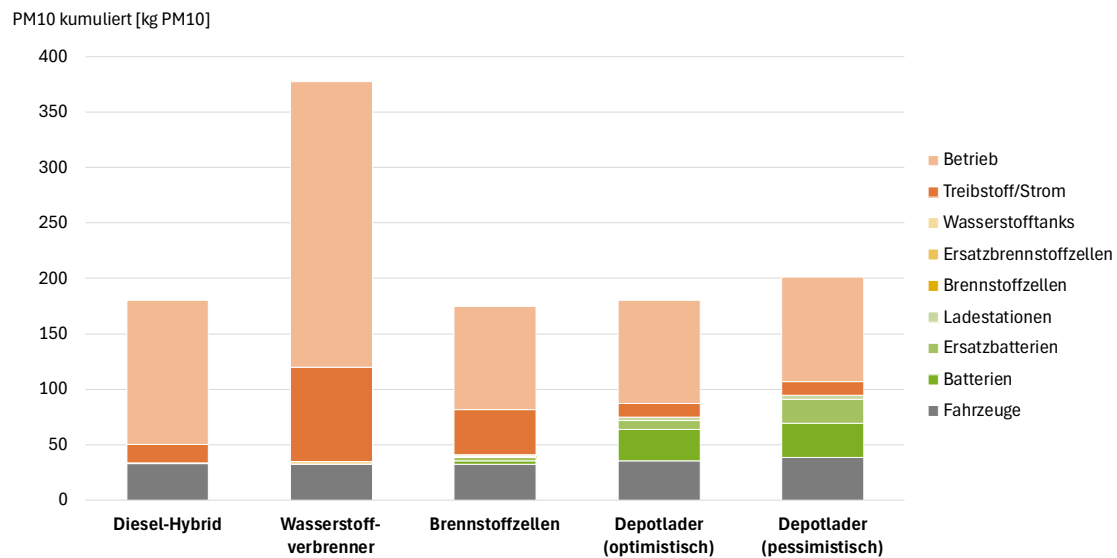
Die direkten und kumulierten Emissionen sind in Abbildung 43, Abbildung 44 und Abbildung 45 dargestellt. Sie zeigen für alle Einsatzprofile ein sehr ähnliches Bild. Darum wird hier auf die Diskussion in Kapitel 4.1.4 verwiesen. Hier sei nur noch einmal darauf hingewiesen, dass insbesondere die indirekten NO_x- und PM₁₀-Emissionen mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet ist und dass darum nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Unterschiede zwischen Depotlader- und Brennstoffzellenbussen signifikant sind.

Abbildung 43: Technologievergleich: CO₂-Emission pro Jahr in Bahners_GB

Grafik EcoExistence

Abbildung 44: Technologievergleich: NO_x-Emission pro Jahr in Bahners_GB

Grafik EcoExistence

Abbildung 45: Technologievergleich: PM10-Emission pro Jahr in Bahners_GB

Grafik EcoExistence

4.6. Sensitivitätsbetrachtungen

4.6.1. Strom / Wasserstoff aus Flusswasserkraftwerk

Es wurde gezeigt, dass die Wasserstoffherstellung aus dem künftigen Schweizer Strommix einen beträchtlichen Teil der Umweltbelastung von Wasserstoffverbrennern und, in geringerem Ausmass, auch von Brennstoffzellenfahrzeugen verursacht. Entsprechend liegt es nahe zu betrachten, wie die Ergebnisse aussehen würden, wenn für die Wasserstoffproduktion und für das Laden der Batteriebusse Strom aus einem Flusswasserkraftwerk verwendet würde. Diese Stromquelle wurde gewählt, weil die Herstellung von Wasserstoff Bandenergie benötigt und Flusskraftwerke die ökologisch vorteilhafteste Bandenergie bereitstellen können. Würden PV oder Windenergie eingesetzt, könnte die Elektrolyseanlage nur wenige Stunden am Tag auf Volllast betrieben werden, was ökologisch und vor allem ökonomisch sehr ungünstig wäre.

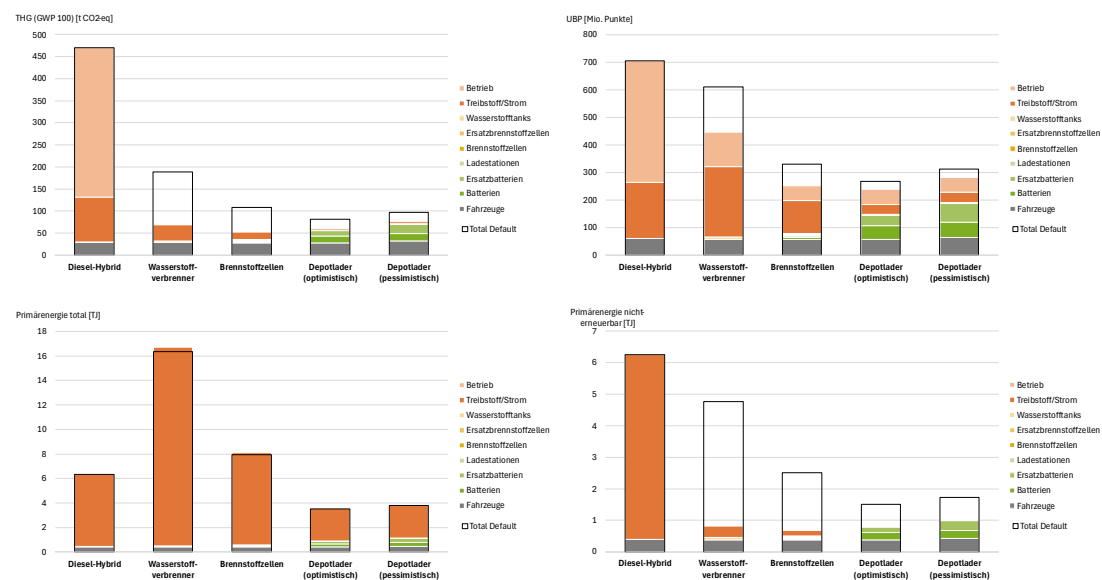
In diesem Szenario verringern sich die Umweltbelastungen der Wasserstoffverbrenner- und Brennstoffzellenbusse erheblich (Abbildung 46). Auch die Batteriebusse werden mit diesem Strom umweltfreundlicher, aber wegen des geringeren Energiebedarfs der Batteriebusse ist der Unterschied zum Standardszenario kleiner. Damit werden die ökologischen Vorteile der Batteriebusse gegenüber den Wasserstoffbussen geringer oder verschwinden ganz.

Auch mit Strom aus Flusswasserkraftwerken bleiben Brennstoffzellenbusse bezüglich aller betrachteten Umweltauswirkungen besser als Wasserstoffverbrennerbusse. Batteriebusse verursachen auch in diesem Szenario deutlich weniger UBP als die Wasserstoffverbrenner.

Bezüglich Treibhausgasemissionen werden die Wasserstoffverbrenner geringfügig besser als die Batteriebusse. Die Batteriebusse schneiden in dem Szenario bei den Treibhausgasen und den UBP etwas schlechter ab als die Brennstoffzellenbusse, bezüglich totalem Primärenergiebedarf sind sie nach wie vor die beste Alternative. Diese Unterschiede können aber nicht als signifikant betrachtet werden. Abbildung 46 zeigt exemplarisch die Ergebnisse im mittelländischen Regionalverkehr mit Gelenkbusen.

Zu dieser Betrachtung ist anzumerken, dass sie nur dann Sinn ergibt, wenn die Nachfrage nach Strom oder Wasserstoff, die durch diese Busse ausgelöst wird, tatsächlich durch zusätzliche Laufwasserkraftwerke gedeckt wird. Das ist nicht sehr realistisch, weil in den Energieperspektiven, die zur Berechnung des künftigen Strommixes verwendet wurden, davon ausgegangen wurde, dass die Wasserkraft so stark und so rasch wie möglich ausgebaut wird. Entsprechend gibt es praktisch kein Potenzial für zusätzlichen Strom aus Flusswasserkraftwerken gegenüber den Annahmen des Strommixes in dieser Studie. Entsprechend müssen diese Resultate als eher theoretisch betrachtet werden.

Abbildung 46: Umweltauswirkungen im Einsatzprofil RV-M_GB_Int bei Annahme von 100% Wasserkraft für Strom- und Wasserstoffproduktion



Grafik EcoExistence

4.6.2. Zweites Leben für die Busbatterien

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Batterien besonders bezüglich UBP einen grossen Teil der Umweltbelastung verursachen. Allerdings wurde auch darauf hingewiesen, dass Batteriefahrzeuge durch den gewählten Modellierungsansatz des cut-off bei Materialien, die in eine

Recycling gehen, systematisch benachteiligt werden. In dieser Sensitivität betrachten wir den Einfluss eines zweiten Lebens der Busbatterien auf die Ergebnisse der Ökobilanz. Wir gehen davon aus, dass die Batterien an ihrem Lebensende noch 70-80% der ursprünglichen Kapazität aufweisen. Das heisst, dass eine Batterie, die 2030 eine Nettokapazität von 1000 kWh aufgewiesen hat, bei ihrem Ersatz im Jahr 2036 noch rund 750 kWh Nettokapazität aufweist. Weiter nehmen wir an, dass diese gebrauchte Batterie in ihrem gesamten Restleben noch etwa 1/3 der Energie speichern und wieder abgeben kann, die von einer neuen Batterie mit 750 kWh Nettoenergieinhalt in 2036 gespeichert werden könnte. Entsprechend darf sie maximal 1/3 dessen kosten, was eine neue Batterie kosten würde. Mit den Kostenentwicklungen gemäss BFE 2020 (Kosten NMC Batterie in 2030: 309 CHF/kWh; 2036: 211 CHF/kWh; 2042: 159 CHF/kWh) ergibt sich, dass der finanzielle Wert der Second-Life Batterien im Jahr 2036 noch rund 20% des Neuwerts von 2030 betragen wird²⁷. Die so berechneten Werte der Allokationsfaktoren für die Einsatzprofile sind in Tabelle 13 gegeben. Die Unterschiede stammen daher, dass die Batterien in unterschiedlichen Jahren ausgetauscht werden.

Tabelle 13: Allokationsfaktoren für zweites Leben der Batterien

	Rasche Batterieentwicklung		Langsame Batterieentwicklung	
	Erste Batterie	Ersatzbatterie	Erste Batterie	Ersatzbatterie
OV_SB_HVZ-V	17.2%	20.2%	16.3%	18.1%
OV_GB_Int	19.4%	19.9%	18.7%	19.4%
RV-M_GB_Int	19.4%	20.7%	19.7%	19.1%
RV-B_SB_Int	19.4%	20.7%	19.7%	19.1%
Bahners_GB	18.2%	20.1%	17.8%	18.5%

Ein Allokationsfaktor von 17.2% für die erste Batterie bedeutet, dass 17.2% der Umweltwirkung der Herstellung der Batterie nicht in den vorliegenden LCA-Ergebnissen enthalten sind, weil dieser Anteil in den LCA-Ergebnissen der stationären Nutzung der Batterie im zweiten Leben angerechnet wird.

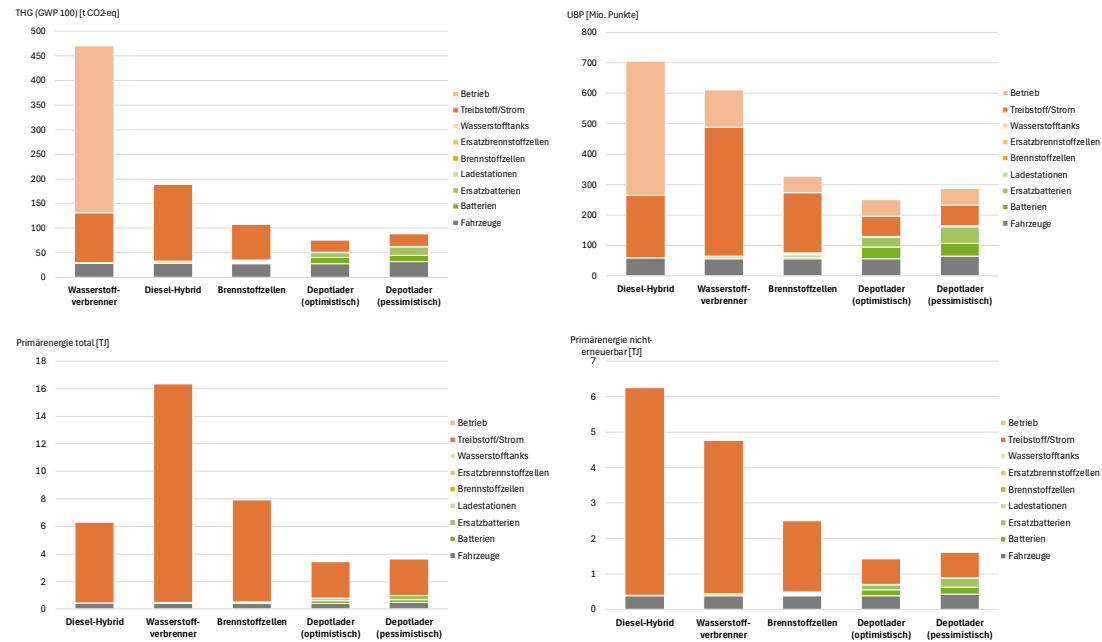
Tabelle EcoExistence.

Abbildung 47 zeigt exemplarisch die Ergebnisse im mittelländischen Regionalverkehr mit Gelenkbussen mit dem Strommix gemäss EP2050+ zum Laden und zur Wasserstoffproduktion. Abbildung 48 zeigt die gleichen Ergebnisse mit Strom aus 100% Wasserkraft.

Die Berücksichtigung eines zweiten Lebens der Batterien von Depotladern reduziert die Umweltbelastung der Batterie um etwas weniger als 20%. Der Einfluss auf das Gesamtergebnis ist geringer: Die Klimaeffekte von Depotladern sind mit Berücksichtigung eines zweiten Lebens 7-8% geringer, die UBP 6-8%. Bei der Primärenergie liegt der Unterschied bei 3-6%. Insgesamt kann gesagt werden, dass ein zweites Batterieleben die Vorteile der Depotlader noch etwas verstärkt aber kein grundsätzlich neues Bild bewirkt.

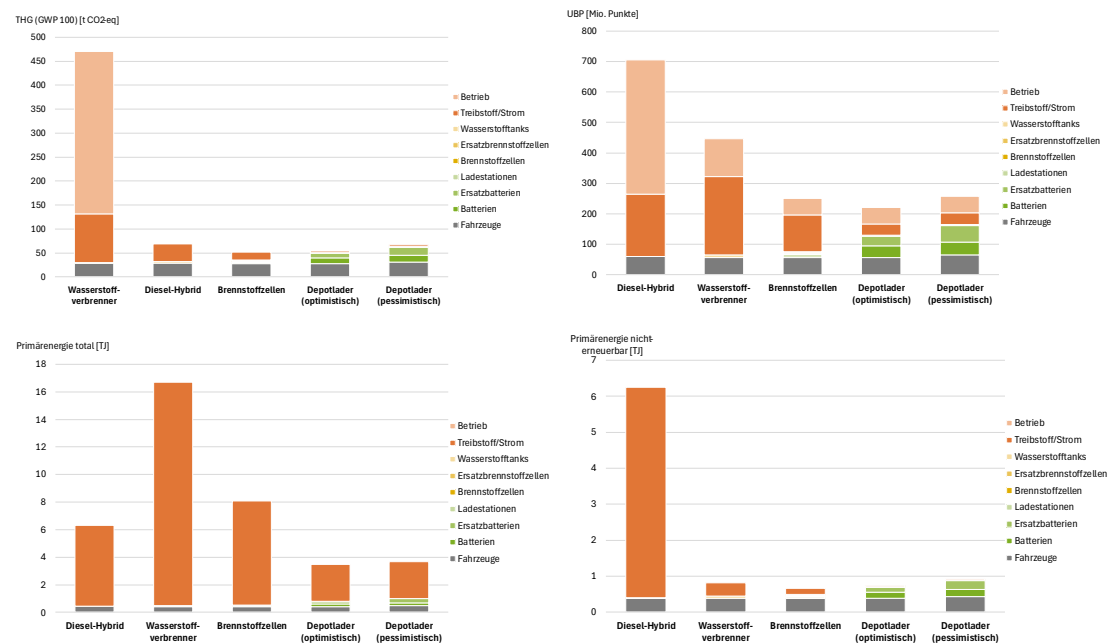
²⁷ Ökonomisch sinnvoll ist die Allokation, weil sich der Wert von Second-Life-Batterien aus den künftig zulässigen Kosten pro gespeicherter Energiemenge ableiten lässt. Dieser Wert stellt den abziehbaren Restwert aus dem ersten Lebenszyklus dar.

Abbildung 47: Umweltauswirkungen im Einsatzprofil RV-M_GB_Int bei Annahme eines zweiten Lebens der Busbatterie mit Strommix



Grafik EcoExistence

Abbildung 48: Umweltauswirkungen im Einsatzprofil RV-M_GB_Int bei Annahme eines zweiten Lebens der Busbatterie mit 100% Wasserkraft zur Strom- und Wasserstoffproduktion



Grafik EcoExistence

Unter der Annahme, dass die Busbatterien nach dem mobilen Einsatz ein zweites Leben als stationäre Batterie haben werden, sind Batteriebusse in allen Einsatzprofilen und bezüglich allen Umweltindikatoren meist recht deutlich die beste Option, wenn der Strommix der Energieperspektiven zum Laden und zur Wasserstoffproduktion angenommen wird.

Unter der Annahme von 100% Flusswasserkraft können Brennstoffzellen- und Wasserstoffverbrennerbusse auch unter Annahme eines zweiten Batterielebens leicht geringere Treibhausgasemissionen verursachen als Batteriebusse. Bezüglich UBP schneiden so die Brennstoffzellen- und die Batteriebusse deutlich am besten ab.

4.7. Fazit und einsatzprofilübergreifende Diskussion

Wasserstoffverbrennerbusse sind aus ökologischer Sicht in allen betrachteten Einsatzprofilen und hinsichtlich aller Umweltauswirkungen schlechter als Batterie- und Brennstoffzellenbusse, vor allem aufgrund ihrer schlechten Gesamteffizienz. Dieses Ergebnis ist so deutlich, dass es auch bei erheblichen Unsicherheiten hinsichtlich der Szenarien und Daten robust ist. Einzig wenn praktisch CO₂-freier Strom zur Wasserstoffproduktion verwendet würde, könnte ein Wasserstoffverbrennerbus bei den Treibhausgasemissionen vergleichbar abschneiden wie ein Batterie- oder Brennstoffzellenbus.

Batteriebusse gehören in allen betrachteten Einsatzprofilen zu den umweltfreundlichsten Alternativen, selbst wenn aufgrund von Reichweitenbeschränkungen mehr Fahrzeuge eingesetzt werden müssen.

Brennstoffzellenbusse und Batteriebusse haben eine vergleichbare Klimawirkung (Treibhausgasemissionen). Je höher die benötigte Tagesfahrleistung der Busse in dem jeweiligen Einsatzprofil ist, desto kleiner wird der Vorteil der Batteriebusse. Brennstoffzellenbusse verursachen aber tendenziell mehr UBP und haben einen deutlich höheren Primärenergiebedarf als Depotlader²⁸. Bezüglich dieser Indikatoren können die Brennstoffzellenbusse ihren schlechteren Wirkungsgrad und damit höheren Energiebedarf gegenüber Batteriebussen auch bei sehr hohen Tagesfahrleistungen nicht wettmachen.

Die Unterschiede zwischen Batterie- und Brennstoffzellenbusse bei Klimawirkung und gesamter Umweltbelastung in UBP liegen im Bereich der Unsicherheit. Folgende Faktoren tragen am meisten zu dieser Unsicherheit bei:

- **Energiemix Batterieproduktion:** Der Energiemix, der zur Batterieproduktion verwendet wird, verursacht hohe Umweltauswirkungen. Bis 2030 könnte dieser Strom aber schon deutlich umweltfreundlicher hergestellt werden.

²⁸ Die Unterschiede zwischen Depotladern und Brennstoffzellenbussen sind in dieser Studie deutlich kleiner als in Studien, die die durchschnittliche aktuelle Situation betrachten (z.B. Umweltrechner Verkehr). Hauptgründe sind die unterschiedlichen Einsatzprofile und die (damit zusammenhängenden) unterschiedlichen Batteriekapazitäten, die in dieser Studie mehr als doppelt so hoch sind wie im Umweltrechner Verkehr.

- Strommix für Wasserstoffproduktion: je weniger Umweltbelastung dieser verursacht, desto besser werden Brennstoffzellen und Wasserstoffverbrennerfahrzeuge im Vergleich zu Batteriefahrzeugen abschneiden.
- Batteriechemie: Die Nutzung von Lithium-Eisenphosphatbatterien anstelle der im Modell angenommenen NMC-Batterien würde v.a. die UBPs von Batteriebusen weiter senken.
- Hintergrunddaten für relevante Metalle in Batterien: Die Produktionen von Kupfer, Nickel und Cobalt verursachen einen grossen Teil der UBP von Batteriefahrzeugen. Am relevantesten sind dabei SO₂-, PM- und diverse Schwermetallemissionen, die eine hohe Unsicherheit aufweisen.

5. Bestimmung der Gesamtkosten

5.1. Ergebnisse der TCO-Berechnungen

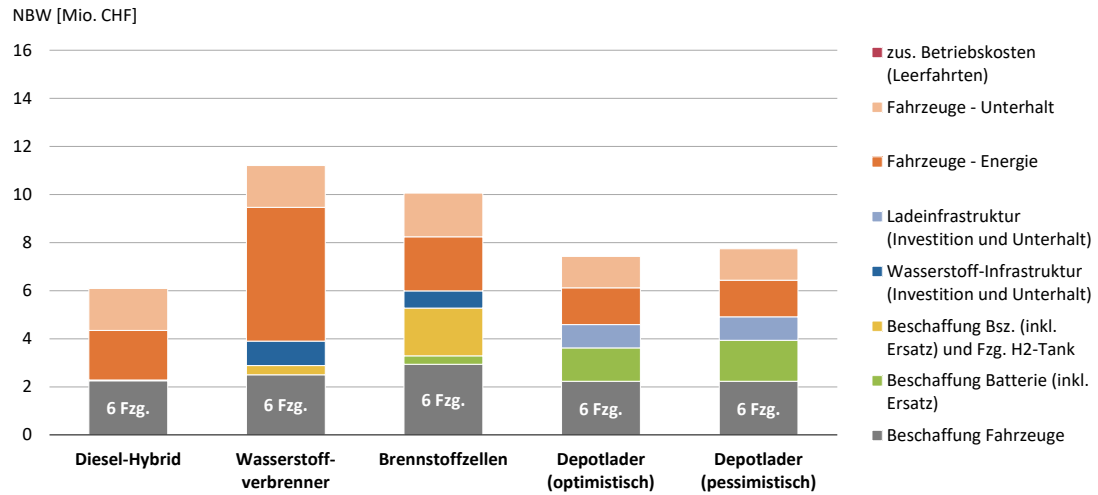
5.1.1. Einsatzprofil Standardbus in Orts-/Agglomerationslinie mit HVZ-Verdichtung

Abbildung 49 und Abbildung 50 zeigen die einzelnen Kostenblöcke der Gesamtkosten sowie die Mehrkosten der verschiedenen fossilfreien Antriebsoptionen im Vergleich zur Referenztechnologie, dem Diesel Hybridbus Euro 7. Die Mehrkosten beziehen sich auf die Linienvollkosten, einschliesslich zusätzlicher betrieblicher Kosten, die unabhängig von der Antriebsart sind (z.B. Fahrpersonal, Verwaltung/Gemeinkosten). Die Kostenunterschiede zwischen den Technologien sind dementsprechend in Bezug auf Linienvollkosten weniger ausgeprägt.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Wasserstoffverbrenner die teuerste Option darstellt, gefolgt vom Brennstoffzellenbus und die zwei Depotladervarianten. Hauptursache dafür ist der hohe Wasserstoffverbrauch des Verbrenners, der, selbst bei dem tiefen angenommenen Wasserstoffpreis, zu überproportionalen Energiekosten führt. Auch die Ausgaben für die erforderliche Wasserstoff-Infrastruktur spielen eine relevante Rolle.

Die Depotlader-Variante (optimistisch) erweist sich als kostengünstigste Lösung, obwohl die Anschaffungskosten für die Batterien und die Kosten für die Ladeinfrastruktur relativ hoch sind (vgl. Abbildung 11) – diese werden jedoch durch die höhere Energieeffizienz weitgehend kompensiert. Im Vergleich zur Referenz verursacht der Wasserstoffverbrenner 25% höhere Kosten, der Brennstoffzellenbus 20% und die Depotlader liegen mit 7% bzw. 8% ebenfalls über dem Referenzwert.

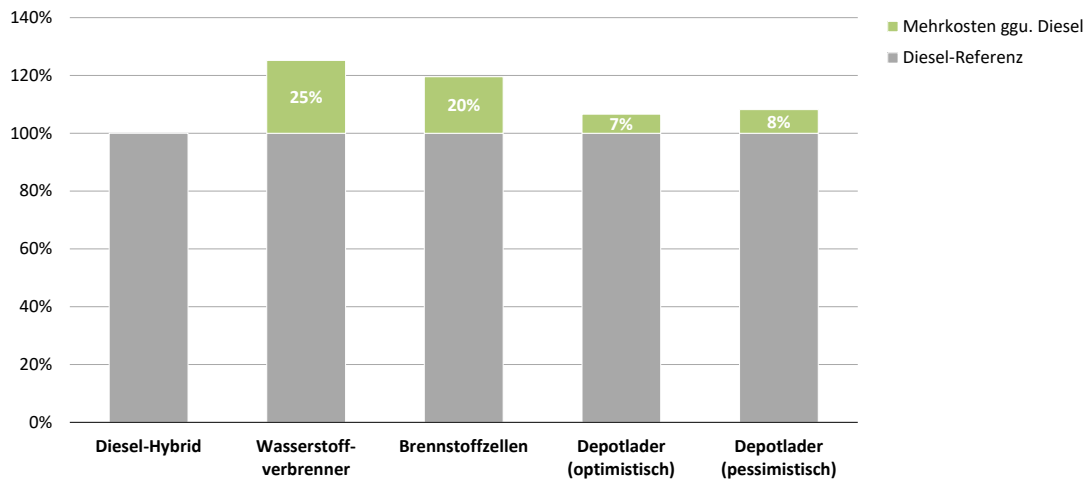
Abbildung 49: Technologievergleich: Gesamtkosten nach Kostenstrom in OV_SB_HVZ-V



Der Nettobarwert (NBW) gibt den Wert aller anfallenden Kosten über eine Fahrzeuggeneration in realen CHF (Basisjahr 2030) an.

Grafik INFRAS.

Abbildung 50: Mehrkosten ggü. Diesel-Hybrid in OV_SB_HVZ-V



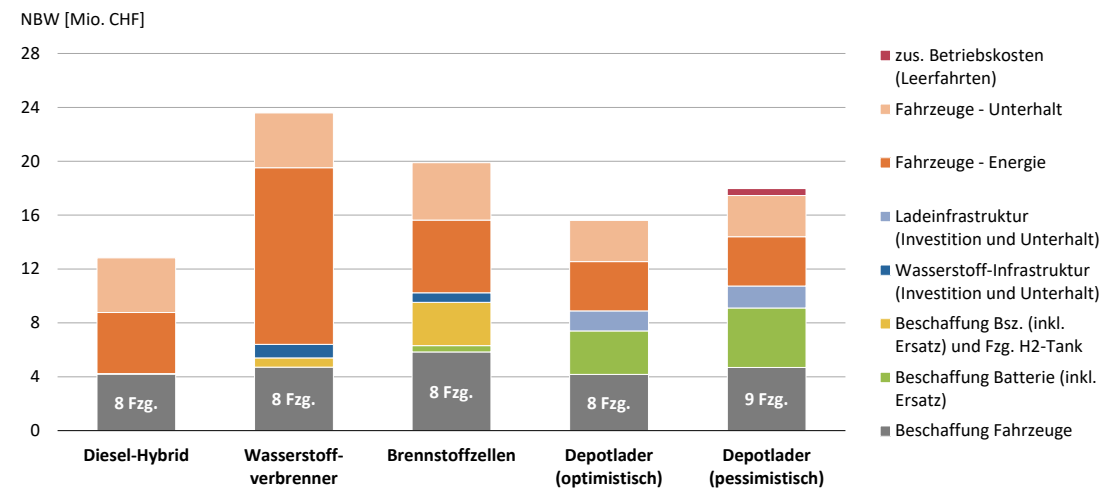
Mehrkosten werden auf Basis der Vollkosten berechnet.

Grafik INFRAS.

5.1.2. Einsatzprofil Gelenkbus in Orts-/Agglomerationslinie, integral

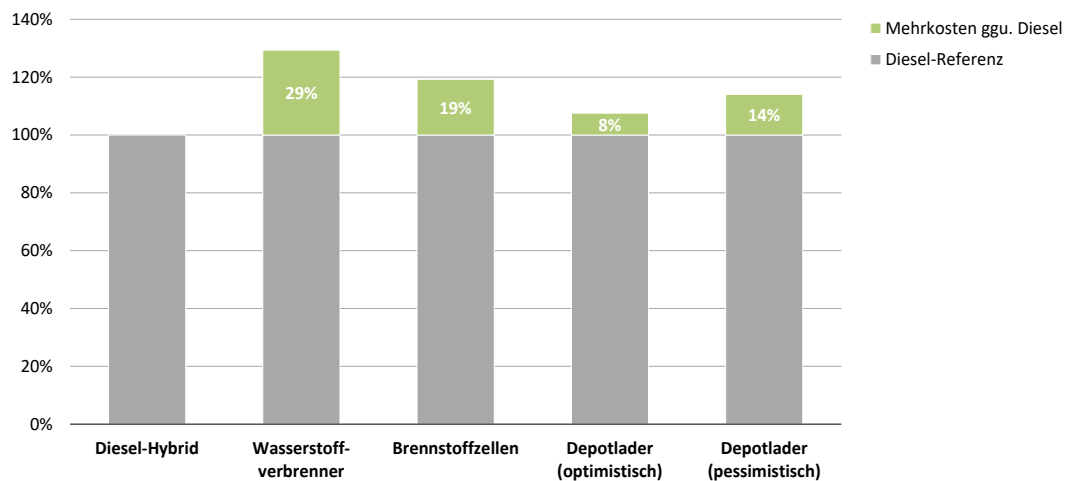
Die Ergebnisse (vgl. Abbildung 51 und Abbildung 52) zeigen ein ähnliches Bild: Der Wasserstoffverbrenner ist die teuerste Option, gefolgt vom Brennstoffzellenbus. Die absoluten Kosten für dieses Einsatzprofil fallen insgesamt höher aus, da die Fahrleistung höher ist und ein zusätzlicher Fahrzeugbedarf entsteht. Bei der pessimistischen Depotladervariante ist die Reichweite nicht ausreichend, was den Einsatz eines zusätzlichen Busses und zusätzliche Betriebskosten erfordert. Die dadurch entstehenden Mehrkosten beeinflussen das Gesamtergebnis nur geringfügig und der Wasserstoffverbrennerbus bleibt klar die teuerste Option.

Abbildung 51: Technologievergleich: Gesamtkosten nach Kostenstrom in OV_GB_Int



Grafik INFRAS.

Abbildung 52: Mehrkosten ggü. Diesel-Hybrid in OV_GB_Int

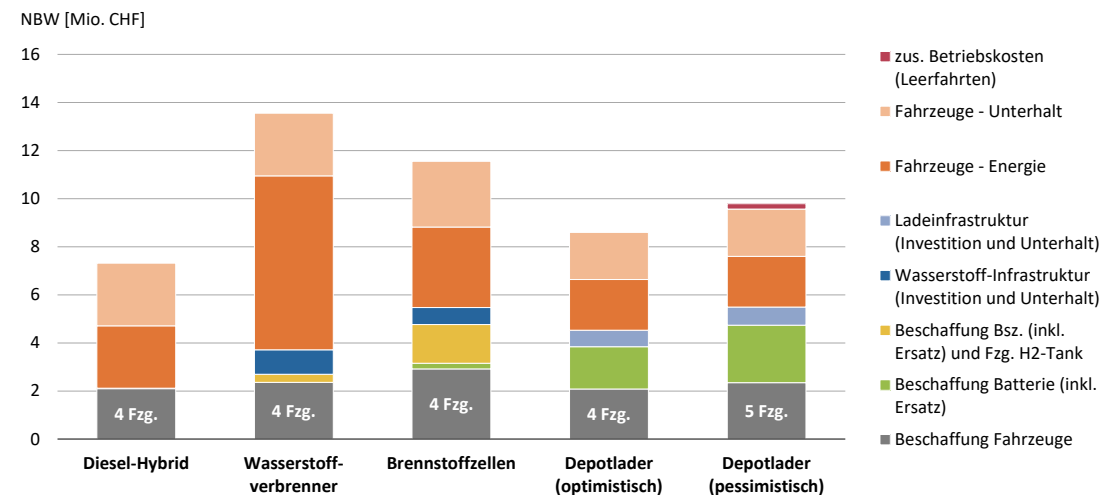


Grafik INFRAS

5.1.3. Einsatzprofil Gelenkbus in Mittelland-Regionallinie, integral

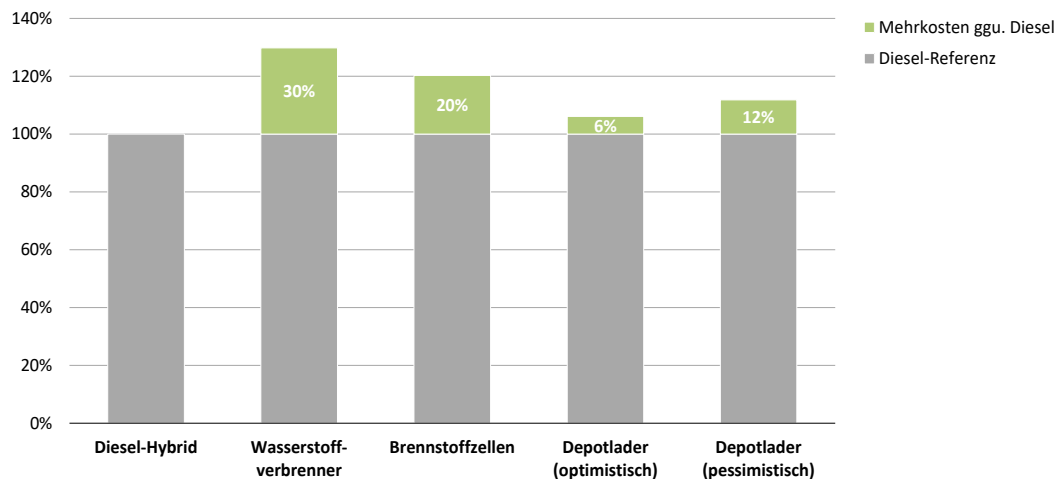
Dieses Einsatzprofil im RPV (vgl. Abbildung 53 und Abbildung 54) basiert auf einer kleinen Flotte mit vier Gelenkbussen. Aufgrund der höheren Fahrgeschwindigkeiten liegt der spezifische Energiebedarf in diesem Szenario über dem der übrigen Einsatzprofile. Daraus ergibt sich, dass der Wasserstoffverbrennerbus, aufgrund der geringen Effizienz, mit rund 30% Mehrkosten die mit Abstand teuerste Option darstellt. Auch wenn in der Depotladevariante (pessimistisch) ein zusätzliches Fahrzeug eingeplant wird, wirkt sich dies nur geringfügig auf die Gesamtkosten aus.

Abbildung 53: Technologievergleich: Gesamtkosten nach Kostenstrom in RV-M_GB_Int



Grafik INFRAS

Abbildung 54: Mehrkosten ggü. Diesel-Hybrid in RV-M_GB_Int

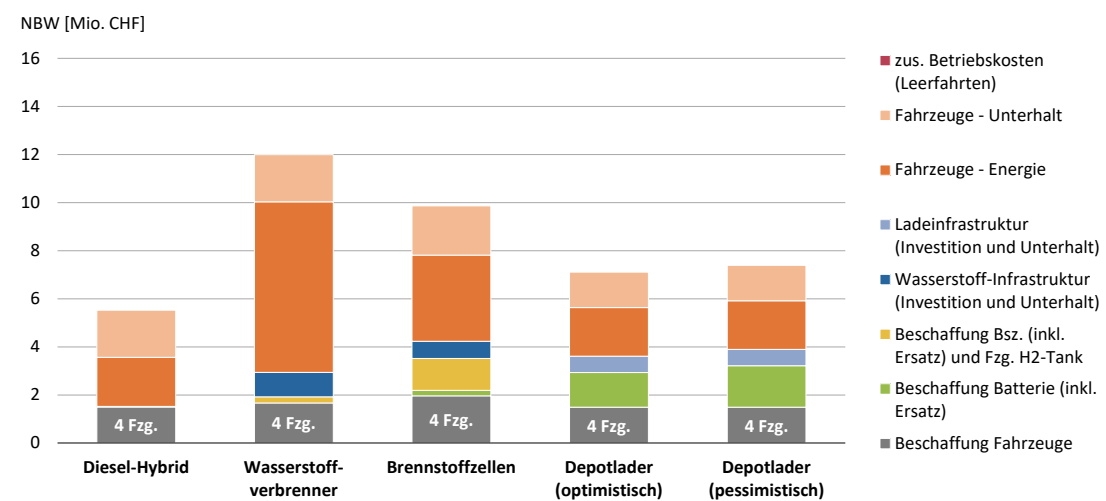


Grafik INFRAS

5.1.4. Einsatzprofil Standardbus in Berggebiets-Regionallinie, integral

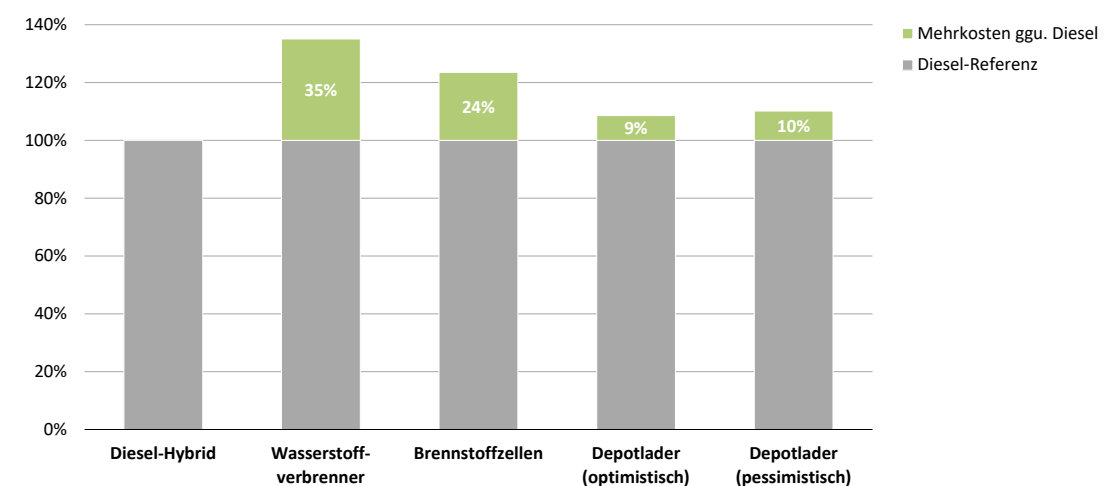
Abbildung 55 und Abbildung 56 zeigen die Ergebnisse für eine Regionallinie im Berggebiet. Die Reichweiten beider Depotlader-Varianten sind im Jahr 2030 ausreichend, entsprechend weisen diese mit jeweils etwa 10% die geringsten Mehrkosten auf. Auch hier ist der Wasserstoffverbrennerbus die teuerste Option.

Abbildung 55: Technologievergleich: Gesamtkosten nach Kostenstrom in RV-B_SB_Int



Grafik INFRAS

Abbildung 56: Mehrkosten ggü. Diesel-Hybrid in RV-B_SB_Int

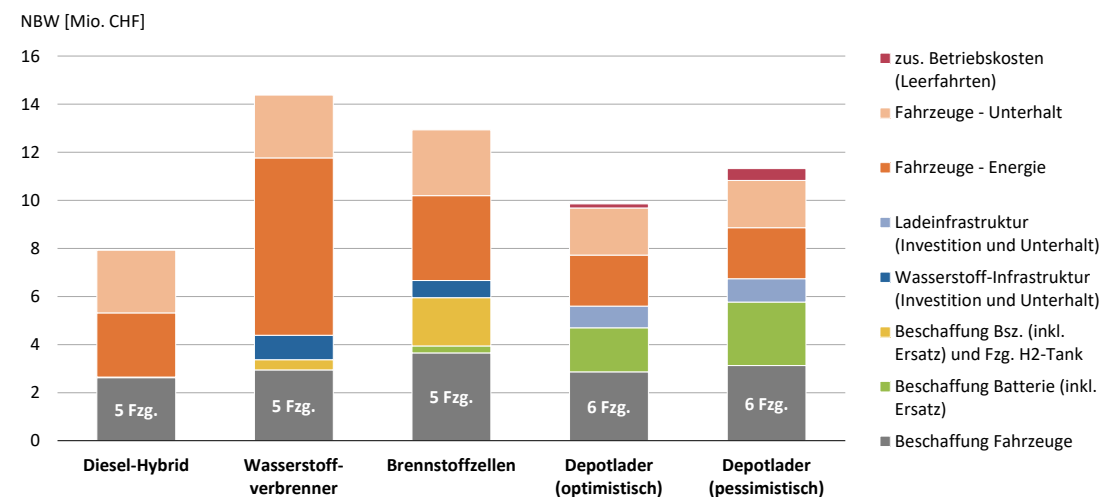


Grafik INFRAS

5.1.5. Einsatzprofil Gelenkbus in Bahnersatz

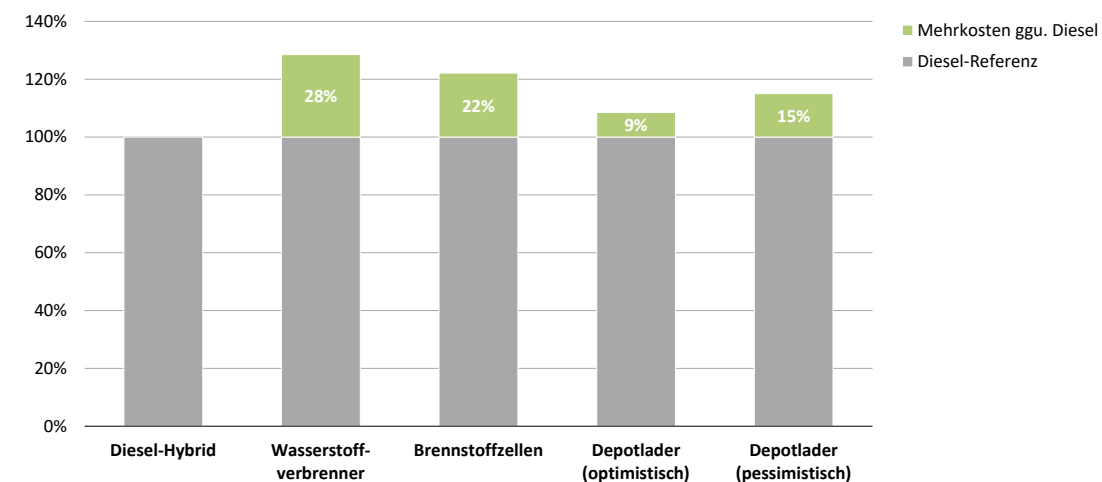
Die Ergebnisse (vgl. Abbildung 57 und Abbildung 58) zeigen, dass bei den Depotladervarianten jeweils ein zusätzliches Fahrzeug aufgrund der hohen Tagesdistanzen bei hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten erforderlich ist, da die Reichweiten für die täglichen Fahrleistungen nicht ausreichen. Zudem ist mit zusätzlichen Betriebskosten durch Ladevorgänge sowie mit Leerfahrten zu rechnen. Daraus ergeben sich Mehrkosten von 9% resp. 15% für die Depotladervarianten, gegenüber 22% für den Brennstoffzellenbus und 28% für den Wasserstoffverbrenner.

Abbildung 57: Technologievergleich: Gesamtkosten nach Kostenstrom in Bahners_GB



Grafik INFRAS

Abbildung 58: Mehrkosten ggü. Diesel-Hybrid in Bahners_GB



Grafik INFRAS

5.2. Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse werden zentrale Annahmen variiert, um die Robustheit der Ergebnisse zu überprüfen.

5.2.1. Energiepreise/Technologievergleich

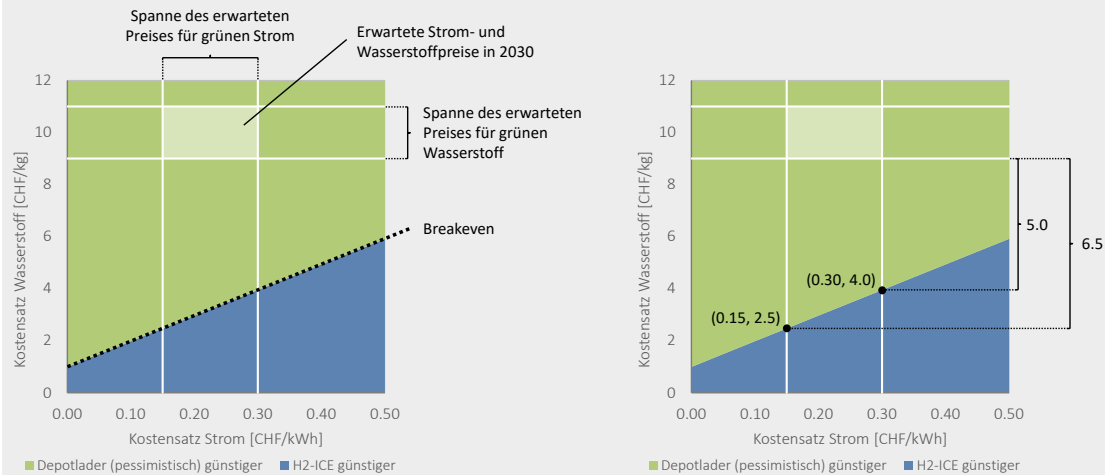
Die folgenden Grafiken zeigen die Auswirkungen unterschiedlicher Energiepreise. Der Wasserstoffverbrenner wird dabei jeweils mit den Depotladervarianten sowie mit dem Brennstoffzellenbus verglichen. Betrachtet wird eine Variation der Strompreise zwischen 0 und 0.50 CHF/kWh sowie der Wasserstoffpreise zwischen 0 und 12 CHF/kg – jeweils für alle Einsatzprofile. Obwohl die aktuellen grünen Wasserstoffpreise an öffentlichen Tankstellen mit etwa 20 CHF/kg deutlich über dieser Preisspanne liegen (H2 MOBILITY 2025), wurde diese Spannweite gewählt, um die erwarteten Wasserstoffpreise an einer eigenen Tankstelle im Jahr 2030 abzudecken und um deren Effekt auf den Technologievergleich zu zeigen. Auch im Jahr 2030 sind Wasserstoffpreise von über 12 CHF möglich. Diese liegen jedoch weit oberhalb des Breakeven und beeinflussen den Technologievergleich nicht.

In den Grafiken markiert die blaue Fläche jene Konstellationen, in denen der Wasserstoffverbrenner günstiger ist. In den grün markierten Bereichen sind die TCO der jeweils gegenübergestellten Antriebstechnologien günstiger. Grundsätzlich sind Strom- und Wasserstoffkosten miteinander verknüpft, da in dieser Studie nur strombasiert erzeugter Wasserstoff betrachtet wird. Eine gewisse Unabhängigkeit besteht jedoch bei importiertem Wasserstoff oder bei besonders günstiger lokaler H₂-Produktion (z.B. über Flusskraftwerke), bei der die Netzkosten gespart werden können. Das hellgrüne Quadrat zeigt jenen Bereich, in dem die Energiepreise für beide Träger im Jahr 2030 realistischerweise liegen könnten.

Lesebeispiel Energiepreise

In der Beispielgrafik werden die Gesamtkosten zweier Technologien, Depotlader (pessimistisch) und H₂-ICE, gegenübergestellt. Im grünen Bereich sind die Gesamtkosten der Depotlader niedriger und im blauen Bereich umgekehrt. Die Trennlinie zwischen den beiden Bereichen entspricht dem Breakeven-Punkt zwischen den zwei Technologien. Entlang der X-Achse werden Strompreise variiert und entlang der Y-Achse werden grüne Wasserstoffpreise variiert. Mit zunehmenden Strompreisen nimmt der Breakeven-Wasserstoffpreis auch zu. Zum Beispiel müsste bei einem Strom-Kostensatz von 0.10 CHF/kWh der Wasserstoffpreis bei ungefähr 2 CHF/kg liegen, um Parität zwischen H₂-ICE und Depotlader zu erreichen. Bei einem Strom-Kostensatz von 0.50 CHF/kWh müsste der Wasserstoffpreis bei ungefähr 5.9 CHF/kg liegen.

Abbildung 59: Annotierte Grafiken als Beispiele für das Leseverständnis. Vergleich der Gesamtkosten zweier Technologien und deren Sensitivität gegenüber Energiepreisen



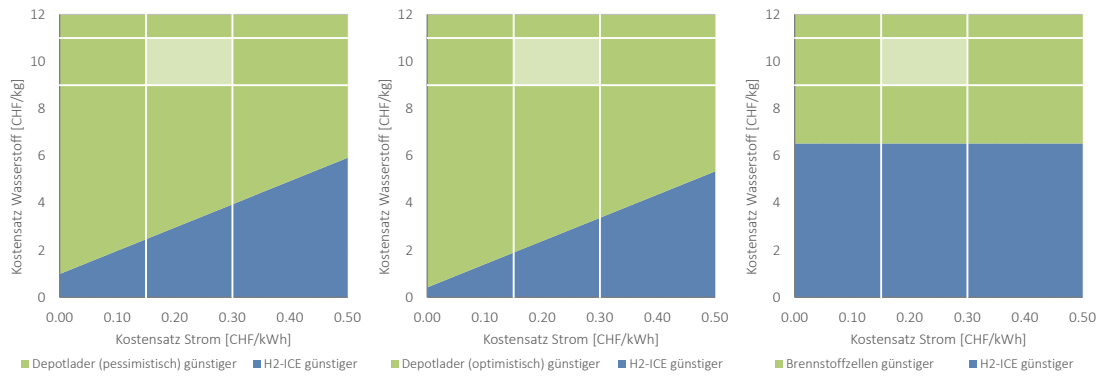
Grafik INFRAS

Die erwarteten Energiepreise im Jahr 2030 sind im hellgrünen Bereich dargestellt. In diesem Beispiel liegen die erwarteten Kosten weit vom Breakeven entfernt. Die Distanz entlang der weissen Linien gibt die nötige Kostenentwicklung eines Energieträgers an. Die Wasserstoffpreise müssten sich um 5.0 – 6.5 CHF/kg unter der erwarteten Preisspanne befinden, um den Breakeven-Punkt zu erreichen.

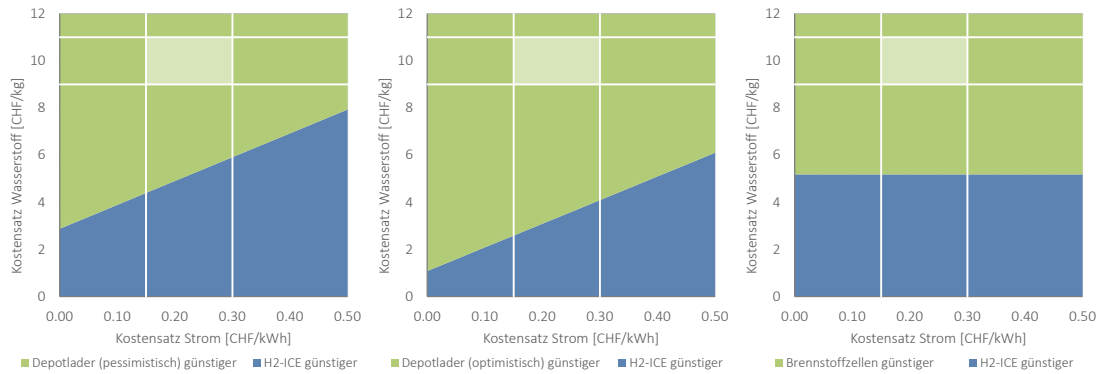
Abbildung 60 und Abbildung 61 zeigen, dass die erwartete Preisspanne der Energieträger in allen betrachteten Einsatzszenarien deutlich oberhalb von der Breakeven-Linie liegt. Dies verdeutlicht, dass Wasserstoffverbrenner hinsichtlich der Gesamtkosten sowohl Depotladern als auch Brennstoffzellenbussen unterlegen sind – selbst bei Schwankungen der Energiepreise. Erst bei Wasserstoffpreisen von 6.53 CHF/kg würde der Wasserstoffverbrenner in einem Einsatzszenario TCO-Parität mit Brennstoffzellenbussen erreichen. Gegenüber Depotlader liegt diese Schwelle bei 6.05 CHF/kg.

Abbildung 60: Sensitivität der Energiepreise für urbane Einsatzprofile

Standardbus auf Orts-/Agglo-Linie mit HVZ-Verdichtung, OV_SB_HVZ_V



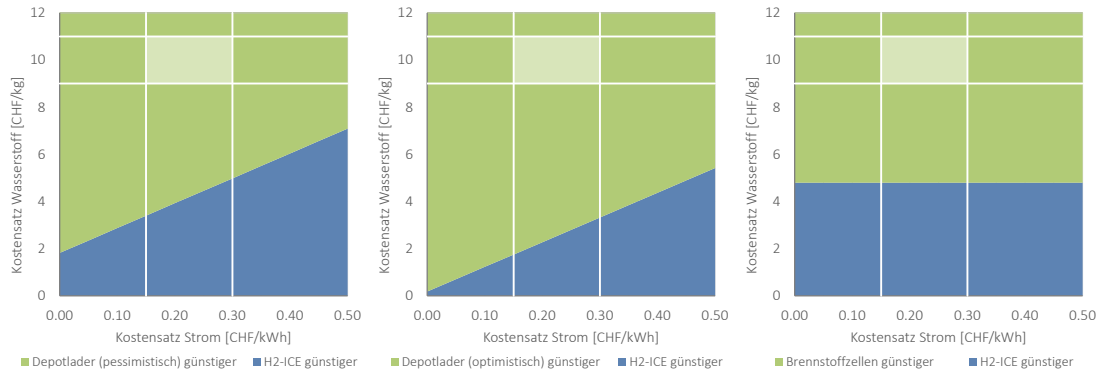
Gelenkbus auf Orts-/Agglo-Linie ohne HVZ-Verdichtung (Integral), OV_GB_Int



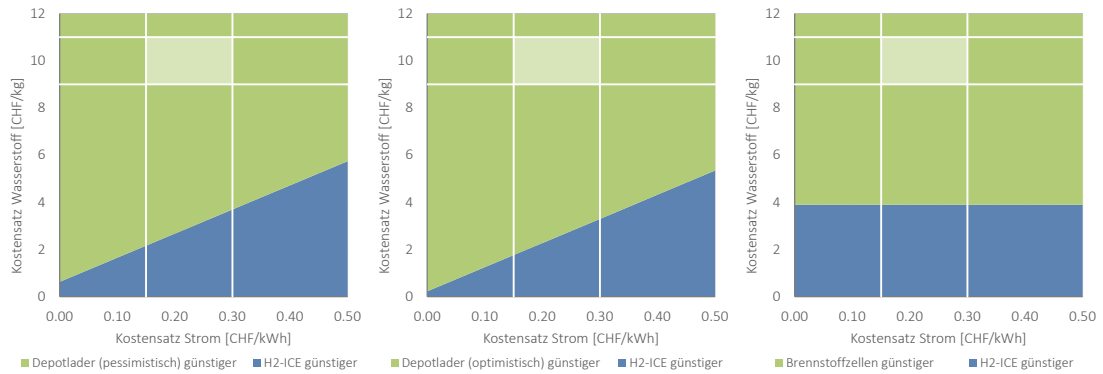
Grafik INFRAS

Abbildung 61: Sensitivität der Energiepreise für regionale Einsatzprofile

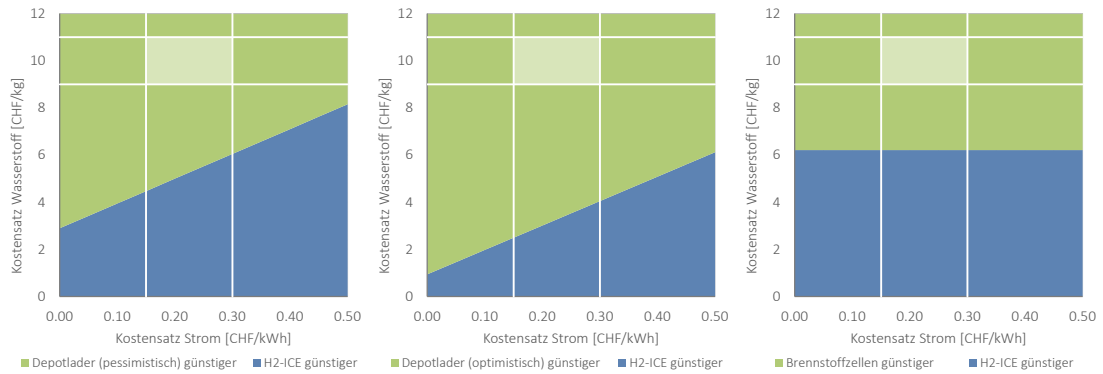
Gelenkbus auf Regionallinie Mittelland ohne HVZ-Verdichtung (Integral), RV_M_GB_Int



Standardbus im Regionalverkehr Berggebiet ohne HVZ-Verdichtung (Integral), RV_G_SB_Int



Gelenkbus im Bahnersatzdienst, Bahners GB



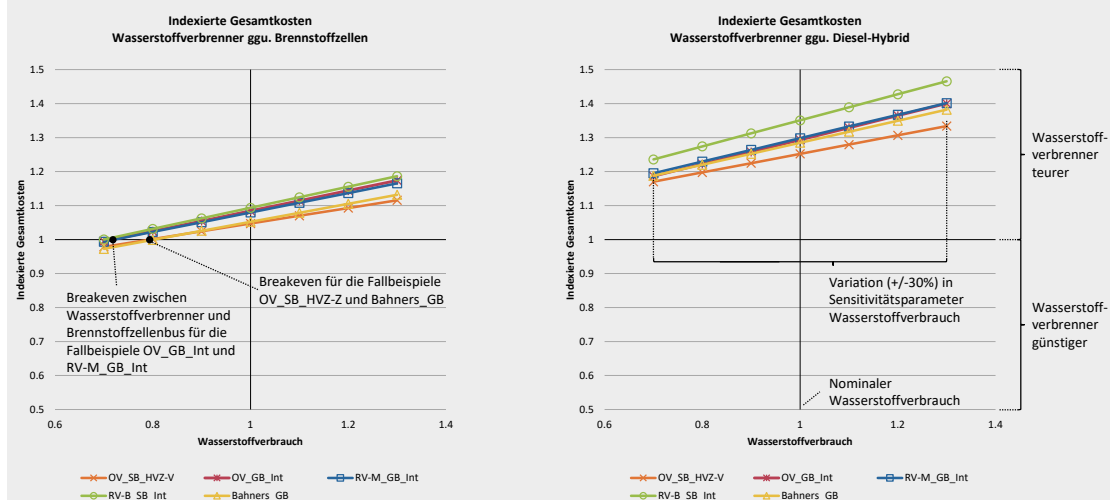
Grafik INFRAS

5.2.2. Indexierte Gesamtkosten

Lesebeispiel Indexierte Gesamtkosten

In Abbildung 62 werden die Gesamtkosten des Wasserstoffverbrenners mit den Gesamtkosten anderer Technologien, Brennstoffzellen und Diesel-Hybrid, verglichen. Entlang der X-Achse wird der Wasserstoffverbrauch des Wasserstoffverbrenner-Busses um $\pm 30\%$ variiert. Der Y-Wert entspricht den Gesamtkosten des Wasserstoffverbrenners, dividiert durch die Gesamtkosten der anderen Technologie. Ein Wasserstoffverbrenner-Bus ist teurer als die verglichene Technologie, wenn der Wert über 1 liegt, und günstiger, wenn er darunter liegt. Die X-Achse entspricht dem Breakeven-Punkt. Jedes Einsatzprofil wird in einer anderen Farbe dargestellt.

Abbildung 62: Annotierte Grafiken als Beispiele für das Leseverständnis. Vergleich der indexierten Gesamtkosten über alle Einsatzprofile hinweg und deren Sensitivität gegenüber einem Sensitivitätsparameter



Bemerkung: Die Einsatzprofile werden gemäss der in Tabelle 3 definierten Abkürzungen bezeichnet. OV_SB_HVZ_V: Standardbus auf Orts-/Agglo-Linie mit HVZ-Verdichtung, OV_GB_Int: Gelenkbus auf Orts-/Agglo-Linie ohne HVZ-Verdichtung (Integral), RV_M_GB_Int: Gelenkbus auf Regionallinie Mittelland ohne HVZ-Verdichtung (Integral), RV_G_SB_Int: Standardbus im Regionalverkehr Berggebiet ohne HVZ-Verdichtung (Integral), Bahners_GB: Gelenkbus im Bahnersatzdienst.

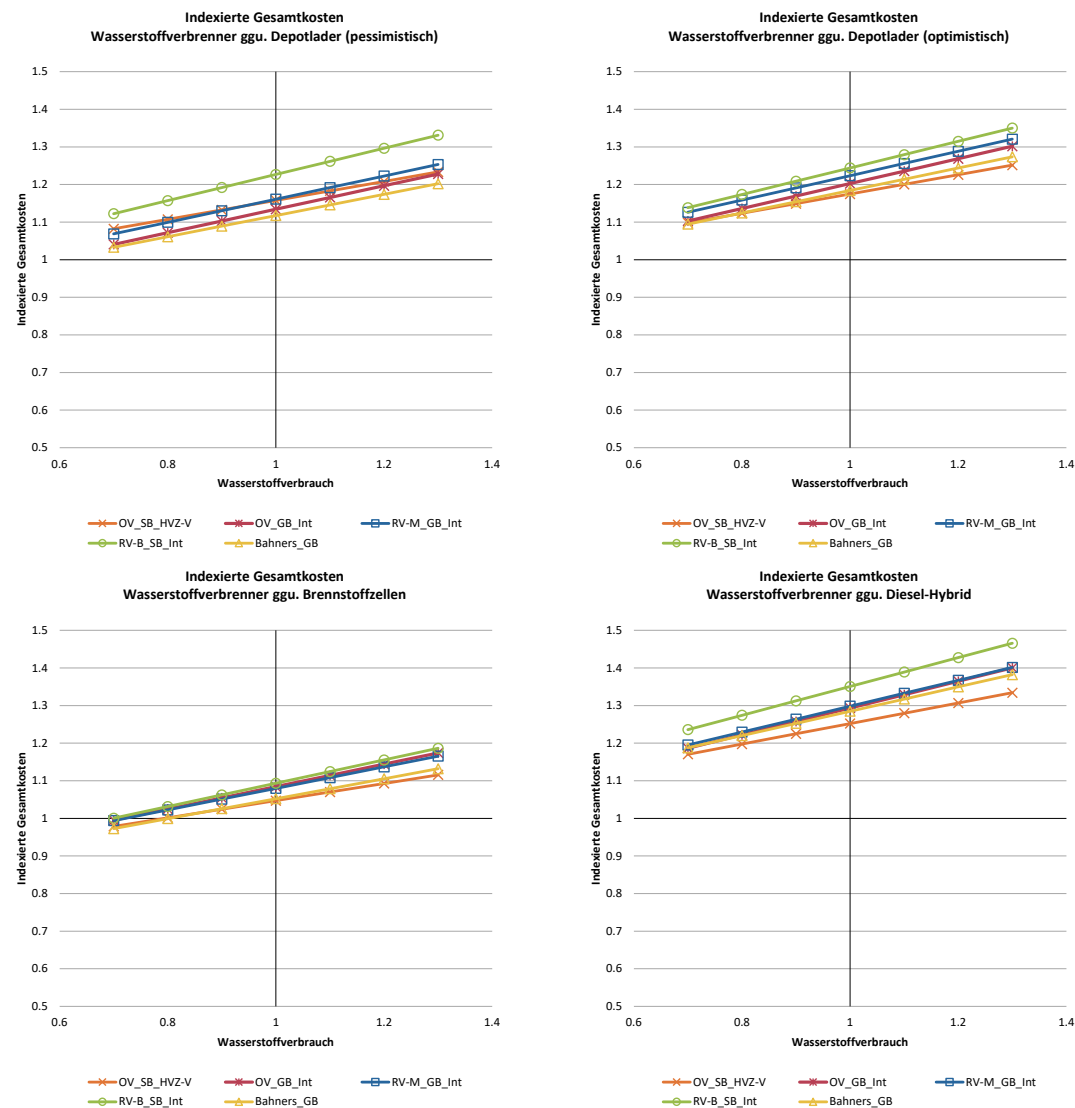
Grafik INFRAS

In der Beispielgrafik links kreuzen vier Linien die X-Achse. Damit erreicht der Wasserstoffverbrenner in den vier Einsatzprofilen Kostenparität mit dem Brennstoffzellen-Bus, wenn sich der Wasserstoffverbrauch um etwa 20% (OV_SB_HVZ-V und Bahners_GB) bzw. um 28% (OV_GB_Int und RV-M_GB_Int) gegenüber der Basisannahme verringert. Das Einsatzprofil RV-M_GB_Int erreicht bei einer Verringerung von 30% fast die Kostenparität. In der Grafik rechts kreuzen keine Linien die X-Achse. In allen Einsatzprofilen ist keine Kostenparität zwischen dem Wasserstoffverbrenner und dem Diesel-Hybrid-Bus erwartet, selbst bei einer Verringerung des Wasserstoffverbrauchs um 30%.

Wasserstoffverbrauch

Abbildung 63 zeigt die Sensitivität der TCO gegenüber einer Variation des Wasserstoffverbrauchs beim Wasserstoffverbrennerbus für sämtliche Einsatzprofile – jeweils im Vergleich zu einer anderen Antriebstechnologie. Selbst bei einer Reduktion des Wasserstoffverbrauchs um 30% im Vergleich zu den Depotladervarianten kann keine TCO-Parität erreicht werden. Je nach Einsatzprofil wird im Vergleich zum Brennstoffzellenbus bei einer Reduzierung um 20% bis 28% eine Parität erreicht. Eine derart starke Verbrauchssenkung gilt jedoch als unrealistisch, da laut Aussagen aus Interviews mit Forschungseinrichtungen selbst bei den effizientesten Wasserstoffmotorkonzepten bis 2030 lediglich Effizienzgewinne von maximal 10% erwartet werden.

Abbildung 63: Sensitivität des Wasserstoffverbrauchs H₂-ICE

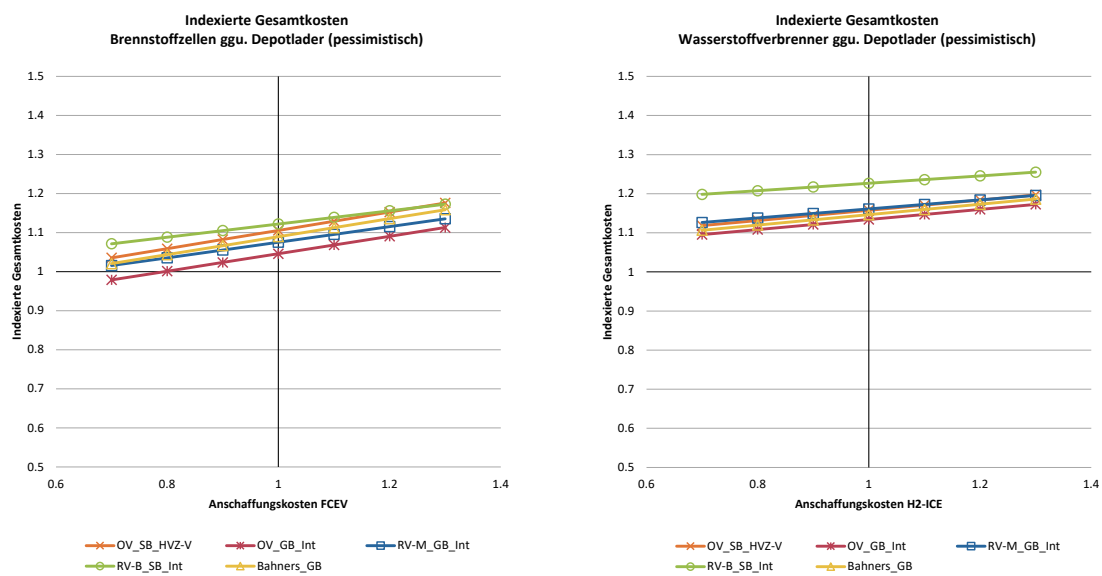


Grafik INFRAS

Investitionskosten

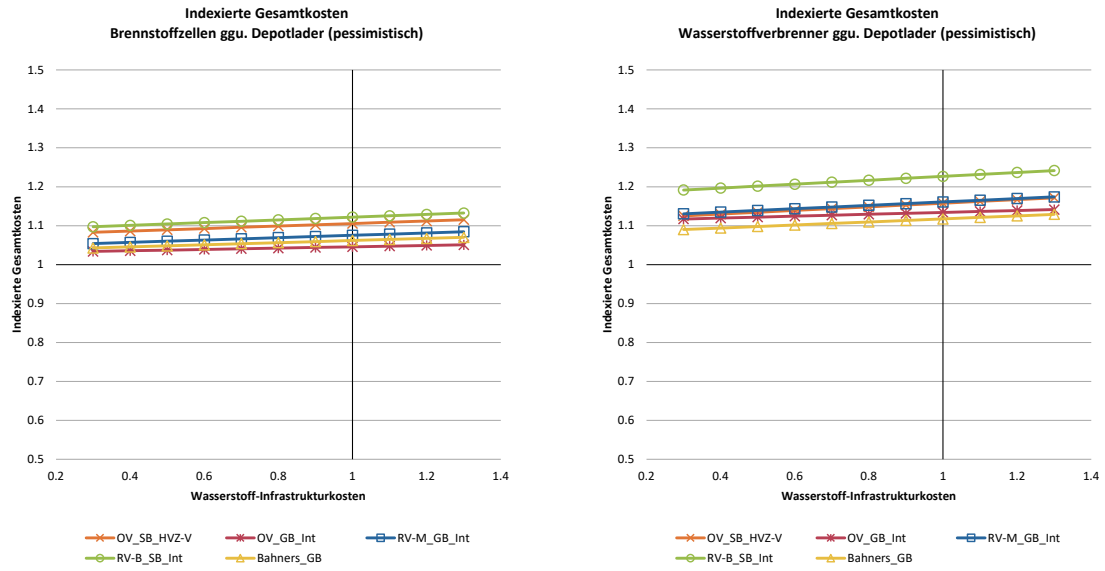
In den folgenden Sensitivitätsanalysen werden die Gesamtkosten des Brennstoffzellenbusses und des Wasserstoffverbrenners dem Depotlader gegenübergestellt. Variiert werden die Anschaffungskosten, die Infrastrukturkosten für Wasserstoff – unter der Annahme einer gemeinsamen Nutzung der Tankstellen durch mehrere Linien – sowie die Notwendigkeit eines Batteriersatzes. Die Ergebnisse zeigen, dass der Wasserstoffverbrennerbus in keiner der untersuchten Varianten eine TCO-Parität erreicht. Die Anschaffungskosten wirken sich auf Brennstoffzellenbusse stärker aus; diese erreichen in einzelnen Fällen eine Parität mit dem Depotlader. Bei den Wasserstoffverbrennerbussen sind die sensitivsten Parameter mit den Betriebskosten verbunden – konkret der Wasserstoffverbrauch und der Wasserstoffpreis.

Abbildung 64: Sensitivität der Anschaffungskosten



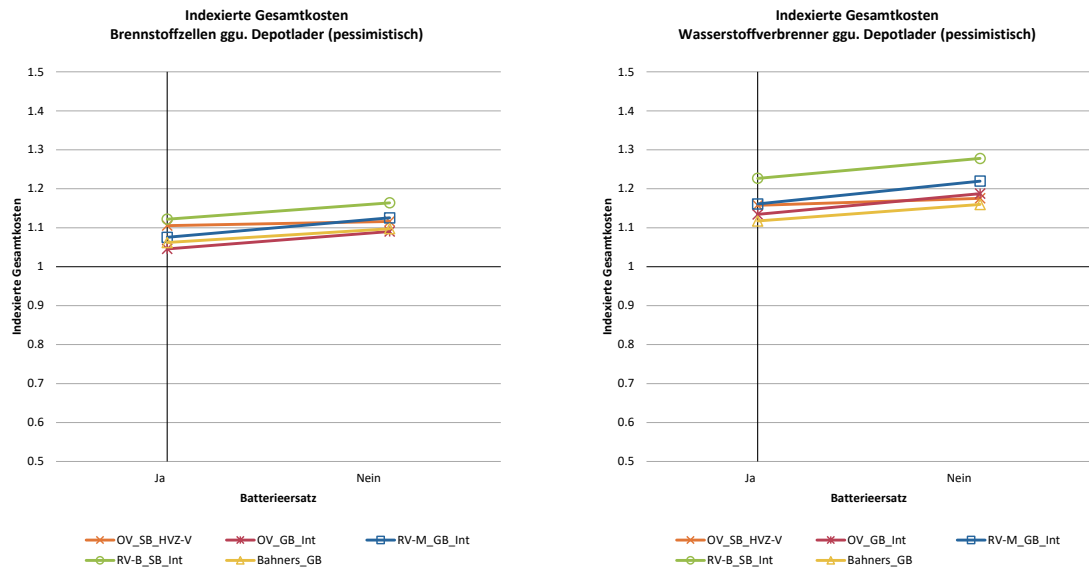
Grafik INFRAS

Abbildung 65: Sensitivität der Wasserstoffinfrastrukturkosten



Grafik INFRAS

Abbildung 66: Sensitivität des Batterieersatzes



Grafik INFRAS

5.3. Fazit zu den Gesamtkosten

Der Wasserstoffverbrennerbus ist, trotz der Annahme, dass grüner Wasserstoff ab 2030 günstig verfügbar sein wird, in allen betrachteten Einsatzprofilen deutlich die teuerste Option für das Jahr 2030 – mit Mehrkosten von 25%–35% gegenüber der Dieselhybrid-Referenz. Hauptursache sind die hohen Energiekosten infolge der geringen Effizienz sowie die Investitionen für die erforderliche Tankinfrastruktur. Die Energiekosten der Wasserstoffverbrenner sind 2.7–3.5 mal so teuer wie Diesel-Hybridbusse und machen den grössten Teil (68–80%) der Mehrkosten der Antriebsart aus. Die Wasserstoff-Infrastrukturkosten tragen 9%–20% zu den Mehrkosten bei. Der Energieverbrauch und die Wasserstoffpreise sind entscheidend. Diese Faktoren überwiegen die im Vergleich zu anderen fossilfreien Technologien geringeren Anschaffungskosten der Wasserstoffverbrennerbusse deutlich.

Der Brennstoffzellenbus ist die zweitteuerste Option mit Mehrkosten von 19%–24% gegenüber der Dieselhybrid-Referenz. Ausschlaggebend sind vor allem die Anschaffungskosten sowie die Kosten für die erforderliche Wasserstofftankinfrastruktur und die vergleichsweise hohen Energiekosten – auch wenn beide unter denen des Wasserstoffverbrennerbusses liegen.

Die Depotladervarianten sind deutlich günstiger als Wasserstoffverbrennerbusse und verursachen Mehrkosten von 6%–15% im Vergleich zur Dieselhybrid-Referenz. Ein Grossteil der Kosten entfällt auf die Batterien, wobei auch die Ladeinfrastruktur einen relevanten Anteil ausmacht. Die Variante mit pessimistischer Batterieentwicklung erfordert in den meisten Fällen zusätzliche Fahrzeuge, was zu höheren Betriebskosten führt und sie leicht verteuert. Insgesamt zeigt sich, dass die Entwicklung der Batteriedichten und -kosten keinen wesentlichen Einfluss auf die Technologieentscheidung hat, auch bei einer langsameren Entwicklung. Die Unterschiede in den Mehrkosten sind so gering, dass sie innerhalb der Unsicherheiten der zugrunde liegenden Annahmen liegen.

Das Einsatzprofil des Bahnersatzes zeichnet sich durch längere tägliche Fahrleistungen aus. Dadurch sind auch in der Variante mit optimistischer Batterieentwicklung zusätzliche Depotlader erforderlich. Dies führt zu etwas höheren Mehrkosten, die jedoch weiterhin unter denen der Wasserstoffvarianten liegen.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass im wahrscheinlichen Kostenbereich für Strom und Wasserstoff die Depotladervarianten durchgehend die kostengünstigere Option darstellen. Selbst im schwierigsten Einsatzprofil müssten Wasserstoffkosten auf 6.0 CHF/kg sinken, um Parität mit Depotlader (pessimistisch) zu erreichen (bei einem Strom-Kostensatz von 0.30 CHF/kWh). Beim Energieverbrauch wird deutlich, dass sich die Effizienz des Wasserstoffverbrennerbusses um mehr als ein Drittel verbessern müsste, um eine TCO-Parität mit dem Depotlader zu erreichen. Dies gilt jedoch als unrealistisch, da laut Aussagen aus Interviews mit Forschungseinrichtungen lediglich Effizienzgewinne von maximal 10% selbst bei den technologisch

fortgeschrittensten Motorkonzepten erwartet werden. Auch bei einer Aufteilung der Wasserstoff-Tankstellenkosten auf mehrere Linien, bei welcher der Anteil des analysierten Einsatzes nur 30% beträgt, bleibt der Wasserstoffverbrenner mindestens 9% teurer als der Depotlader (pessimistisch). Die Sensitivitätsanalysen zu den Anschaffungskosten und den Batteriekosten zeigen, dass der Wasserstoffverbrennerbus in keiner der untersuchten Varianten eine TCO-Parität erreicht.

6. Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf

6.1. Fazit

Die Studie hat Einsatzprofile untersucht, die einen ökologisch und ökonomisch konkurrenzfähigen Einsatz von Wasserstoffverbrennerbussen ermöglichen könnten. Ein solches Szenario wurde jedoch nicht identifiziert. Der Hauptnachteil von Wasserstoffverbrennerbussen liegt in ihrem niedrigen Gesamtwirkungsgrad, der zu hohen Treibstoffkosten und einer relativ hohen Umweltbelastung aus der Treibstoffproduktion. Verbesserungen in diesem Bereich könnten zwar die Leistung steigern, aber selbst in optimistischen Szenarien werden Wasserstoffverbrennerbusse ihre ökologischen und ökonomischen Nachteile nicht überwinden können.

Batteriebusse sind, wenn der künftige Schweizer Strommix für das Laden und die Wasserstoffproduktion angenommen werden, die ökologisch vorteilhafteste Option, wenn man alle Umweltauswirkungen betrachtet. Brennstoffzellenbusse haben einen deutlich höheren Primärenergiebedarf und verursachen mehr Umweltbelastungspunkte, sind aber hinsichtlich der Klimawirkungen mit Batteriebussen vergleichbar. Dieses Ergebnis spiegelt sich auch in der Berechnung der Gesamtkosten wider. Der Wasserstoffverbrennerbus weist die höchsten Mehrkosten auf, gefolgt vom Brennstoffzellenbus und den beiden Depotladervarianten.

Die Ergebnisse der ökologischen Betrachtung sind stark beeinflusst von der Annahme zur Herkunft des Stroms, der zum Laden und zur Wasserstoffherstellung eingesetzt wird. Grundsätzlich gilt: je weniger Umweltbelastung die Strombereitstellung verursacht, desto besser schneiden Brennstoffzellen- und Wasserstoffverbrennerbusse, die mehr Strom pro km benötigen als Batteriebusse, ab. Eine Verwendung des künftigen Schweizer Strommixes für die Umweltbetrachtungen, wie das in den Hauptszenarien gemacht wurde, ist allerdings sinnvoller als die Betrachtung mit rein erneuerbarem Strom. Würde man für das Laden von Batteriebussen oder für die Herstellung von Wasserstoff z.B. 100% Wasserkraft bilanzieren, würde der entsprechende Anteil im Schweizer Strommix fehlen. Damit würde die Umweltwirkung der Busse zwar besser, dafür würde die Umweltwirkung aller anderen Stromanwendungen in der Schweiz schlechter. Es hätte also keinen Effekt auf die Umweltsituation sondern würde nur die Schuld an der Umweltbelastung anderen Prozessen zuordnen (green-washing).

Wenn die Wasserstoffproduktion trotzdem mit Strom aus einem Flusswasserkraftwerk modelliert wird, schneiden Wasserstoffverbrenner und Brennstoffzellenbusse bez. Treibhausgasemissionen etwas besser ab als Batteriebusse (siehe Kap. 4.6.1). Bezüglich UBP und Primärenergieverbrauch sind Wasserstoffverbrenner aber immer noch klar schlechter als die anderen Technologien. Dazu ist zu sagen, dass die künftige Batterieproduktion mit einem CO₂-intensiven chinesischen Strommix bilanziert ist, obwohl man auch annehmen könnte, dass für diese Prozesse dereinst nur Wasser-, Wind- oder Solarstrom eingesetzt werden wird.

6.2. Grenzen der Studie

Die Studie betrachtet unterschiedliche Einsatzbereiche von Bussen, die nicht einem durchschnittlichen Einsatz entsprechen. Der Fokus liegt auf Einsätzen, die für Batteriebusse schwierig zu bewältigen sind. Das hat zur Folge, dass die in diesen Einsätzen benötigten Batteriebusse sehr grosse Batterien einsetzen, die sowohl die Anschaffungskosten als auch die Umweltbelastung dieser Busse erhöhen. Somit können die UBP- oder CO₂-eq-Werte nicht direkt auf andere Situationen übertragen werden. Auf die meisten Anwendungen in der Schweiz übertragbar ist aber die Schlussfolgerung, dass ein batterieelektrischer Antrieb sowohl ökologisch als auch ökonomisch die attraktivste Technologie ist. Dieses Ergebnis darf trotz hoher Unsicherheiten bei einigen Hintergrunddaten als robust betrachtet werden, vor allem weil die Unsicherheiten tendenziell dazu führen, dass die Umweltauswirkungen der Batteriebusse stärker überschätzt werden als die der anderen Antriebskonzepte. Bei Anwendungen mit sehr hohen Anforderungen wie z.B. dem Postautokurs von Münstair aufs Stifserjoch (1500 Höhenmeter auf 20 km) oder der steilsten Busstrecke Europas auf die Griesalp (mit max. 28% Steigung) müsste konkret geprüft werden, ob die Antriebstechnologien technisch möglich wären und wie die Fahrzeuge dafür konfiguriert werden müssten, bevor eine Aussage zum Technologievergleich möglich wäre.

Im Bahnersatzverkehr sind auch Einsätze mit deutlich mehr als den hier betrachteten 500 km Tagesdistanz möglich. In solchen, in dieser Studie jedoch nicht modellierten Fällen kann der Fahrzeugbedarf an batterieelektrischen Bussen bis zu doppelt so hoch sein wie jener an Brennstoffzellenbussen. Für solche Einsätze kann es aus ökologischer Sicht sinnvoll sein, auf Brennstoffzellenbusse zu setzen. Man könnte zum Beispiel erwägen, den Grossteil der Flotte auf Batteriebusse umzustellen, während einige Fahrzeuge mit Brennstoffzellentechnologie als Reserve und für spezielle Einsätze betrieben werden. Dabei wären aber weitere Überlegungen erforderlich hinsichtlich der Angemessenheit einer Flotte mit zwei verschiedenen Antriebstechnologien und den damit verbundenen Herausforderungen, der Aufwand für den Aufbau einer Wasserstofftankstelle sowie der Frage, ob Wasserstoff langfristig zuverlässig verfügbar sein wird.

Aufgrund des Zeithorizonts bis 2030 wurden hybridisierte Wasserstoff-Verbrennungsmotoren nicht berücksichtigt. Laut Interviews plant derzeit kein Hersteller deren Einsatz. Wie in BAV (2022a) diskutiert, sind auf Basis der Erfahrungen mit Diesel-Hybridbussen Energieeinsparungen von 20%-30% vorstellbar. In Kombination mit Effizienzsteigerungen bei H₂-Verbrennungsmotoren könnte diese Technologie ökonomisch konkurrenzfähiges Niveau im Vergleich zu Batteriebussen erreichen. Aus den Interviews geht jedoch klar hervor, dass der Busmarkt derzeit nicht im Fokus der aktuellen H₂-ICE-Entwicklungen steht. Im Vergleich zum LKW-Markt ist er relativ klein und aufgrund des geringeren Leistungsbedarfs weniger gut für H₂-Verbrennungsmotoren geeignet. Daher sehen wir hier vorerst vor allem Potenzial für Pilotprojekte.

6.3. Forschungsbedarf

Um genauere Aussagen zu den Umweltauswirkungen von Batterie- und Brennstoffzellenbussen zu machen, müsste die Qualität der wichtigsten²⁹ Hintergrunddaten verbessert werden. In diesem Projekt betrifft dies insbesondere die Produktion von Kupfer, Nickel, Mangan und Kobalt sowie die Daten zum Mittelspannungsnetz (Chromemissionen durch Auswaschung von Holzschutzmitteln aus Holzmasten). Darüber hinaus sollten Hintergrunddaten möglichst transparent und vollständig sein, um die Auswirkungen von Vernachlässigungen oder Modellierungsgrundsätzen genau abschätzen zu können. Konkret bedeutet dies, dass in Hintergrunddatenbanken auf ein willkürliches Abschneiden von Co-Produkten (einschliesslich den Rohstoffen für Recyclingprozesse) verzichtet werden sollte. Stattdessen können Allokationen mit einem Allokationsfaktor von 0 vorgenommen werden. Dies führt numerisch zu denselben Ergebnissen wie ein Abschneiden, ermöglicht den Nutzenden der Daten aber eine Sensitivitätsanalyse, wie sie auch von ISO 14'044 verlangt wird.

Aufgrund dieser Analyse sind Wasserstoffverbrennerbusse für Linienbusse weder ökonomisch noch ökologisch geeignet. Diese Einschätzung deckt sich mit den Aussagen aus Interviews mit Vertretern aus Forschung und Industrie. Der Wasserstoff-Verbrennungsmotor wird zurzeit jedoch intensiv für andere Anwendungsfälle mit hoher Last, beispielsweise bei schweren Nutzfahrzeugen, untersucht und könnte dort eine valide Alternative darstellen.

²⁹ «wichtig» im Sinne von Relevanz am Gesamtergebnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ökologischer und ökonomischer Vergleich alternativer Antriebe zu Diesel-Hybridbussen in den untersuchten Einsatzprofilen	7
Abbildung 2: Haupttreiber für H ₂ -ICE gemäss den Herstellern	15
Abbildung 3: Anpassung eines Diesel-Motors auf Wasserstoffverbrennung (LPDI SI)	17
Abbildung 4: NO _x -Emissionen nach Luftverhältnis	18
Abbildung 5: NO _x -Emissionen und H ₂ -Emissionen	19
Abbildung 6: Beteiligung nach Ländern an öffentlich geförderten Forschungsprojekten	20
Abbildung 7: Frühes Interesse an Wasserstoffverbrenner (Teil I)	21
Abbildung 8: Zeitleiste Demonstrations- und Konzeptfahrzeuge (Teil II)	23
Abbildung 9: Vorder- und Hintergrundsystem mit Systemgrenze	31
Abbildung 10: Strommix Schweiz 2030 - 2046	41
Abbildung 11: Anschaffungskosten Standardbus (oben) und Gelenkbus (unten)	47
Abbildung 12: Technologievergleich: Treibhausgasemissionen pro Jahr in OV_SB_HVZ-V	49
Abbildung 13: Technologievergleich: Primärenergie pro Jahr in OV_SB_HVZ-V	50
Abbildung 14: Technologievergleich: Umweltbelastungspunkte pro Jahr in OV_SB_HVZ-V	51
Abbildung 15: Beiträge der Umweltauswirkungen zu den gesamten UBP von Diesel-Hybrid-Bussen	52
Abbildung 16: Beiträge der Umweltauswirkungen zu den gesamten UBP von Wasserstoffverbrennerbussen	53
Abbildung 17: Beiträge der Umweltauswirkungen zu den gesamten UBP von Brennstoffzellenbussen	54
Abbildung 18: Beiträge der Umweltauswirkungen zu den gesamten UBP von Depotladerbussen	55
Abbildung 19: Technologievergleich: CO ₂ -Emission pro Jahr in OV_SB_HVZ-V	56
Abbildung 20: Technologievergleich: NO _x -Emission pro Jahr in OV_SB_HVZ-V	57
Abbildung 21: Technologievergleich: PM10-Emission pro Jahr in OV_SB_HVZ-V	57
Abbildung 22: Technologievergleich: Treibhausgasemissionen pro Jahr in OV_GB_Int	59
Abbildung 23: Technologievergleich: Primärenergiebedarf pro Jahr in OV_GB_Int	60
Abbildung 24: Technologievergleich: Umweltbelastungspunkte pro Jahr in OV_GB_Int	61
Abbildung 25: Technologievergleich: CO ₂ -Emission pro Jahr in OV_GB_Int	62
Abbildung 26: Technologievergleich: NO _x -Emission pro Jahr in OV_GB_Int	62
Abbildung 27: Technologievergleich: PM10-Emission pro Jahr in OV_GB_Int	63
Abbildung 28: Technologievergleich: Treibhausgasemissionen pro Jahr in RV-M_GB_Int	64
Abbildung 29: Technologievergleich: Primärenergiebedarf pro Jahr in RV-M_GB_Int	65
Abbildung 30: Technologievergleich: Umweltbelastungspunkte pro Jahr in RV-M_GB_Int	66

Abbildung 31: Technologievergleich: CO ₂ -Emission pro Jahr in RV-M_GB_Int _____	67
Abbildung 32: Technologievergleich: NO _x -Emission pro Jahr in RV-M_GB_Int _____	67
Abbildung 33: Technologievergleich: PM10-Emission pro Jahr in RV-M_GB_Int _____	68
Abbildung 34: Technologievergleich: Treibhausgasemissionen pro Jahr in RV-B_SB_Int _____	69
Abbildung 35: Technologievergleich: Primärenergiebedarf pro Jahr in RV-B_SB_Int _____	70
Abbildung 36: Technologievergleich: Umweltbelastungspunkte pro Jahr in RV-B_SB_Int _____	71
Abbildung 37: Technologievergleich: CO ₂ -Emission pro Jahr in RV-B_SB_Int _____	72
Abbildung 38: Technologievergleich: NO _x -Emission pro Jahr in RV-B_SB_Int _____	72
Abbildung 39: Technologievergleich: PM10-Emission pro Jahr in RV-B_SB_Int _____	73
Abbildung 40: Technologievergleich: Treibhausgasemissionen pro Jahr in Bahners_GB _____	74
Abbildung 41: Technologievergleich: Primärenergiebedarf pro Jahr in Bahners_GB _____	75
Abbildung 42: Technologievergleich: Umweltbelastungspunkte pro Jahr in Bahners_GB _____	76
Abbildung 43: Technologievergleich: CO ₂ -Emission pro Jahr in Bahners_GB _____	77
Abbildung 44: Technologievergleich: NO _x -Emission pro Jahr in Bahners_GB _____	77
Abbildung 45: Technologievergleich: PM10-Emission pro Jahr in Bahners_GB _____	78
Abbildung 46: Umweltauswirkungen im Einsatzprofil RV-M_GB_Int bei Annahme von 100% Wasserkraft für Strom- und Wasserstoffproduktion _____	79
Abbildung 47: Umweltauswirkungen im Einsatzprofil RV-M_GB_Int bei Annahme eines zweiten Lebens der Busbatterie mit Strommix _____	81
Abbildung 48: Umweltauswirkungen im Einsatzprofil RV-M_GB_Int bei Annahme eines zweiten Lebens der Busbatterie mit 100% Wasserkraft zur Strom- und Wasserstoffproduktion _____	81
Abbildung 49: Technologievergleich: Gesamtkosten nach Kostenstrom in OV_SB_HVZ-V _____	85
Abbildung 50: Mehrkosten ggu. Diesel-Hybrid in OV_SB_HVZ-V _____	85
Abbildung 51: Technologievergleich: Gesamtkosten nach Kostenstrom in OV_GB_Int _____	86
Abbildung 52: Mehrkosten ggu. Diesel-Hybrid in OV_GB_Int _____	86
Abbildung 53: Technologievergleich: Gesamtkosten nach Kostenstrom in RV-M_GB_Int _____	87
Abbildung 54: Mehrkosten ggu. Diesel-Hybrid in RV-M_GB_Int _____	87
Abbildung 55: Technologievergleich: Gesamtkosten nach Kostenstrom in RV-B_SB_Int _____	88
Abbildung 56: Mehrkosten ggu. Diesel-Hybrid in RV-B_SB_Int _____	88
Abbildung 57: Technologievergleich: Gesamtkosten nach Kostenstrom in Bahners_GB _____	89
Abbildung 58: Mehrkosten ggu. Diesel-Hybrid in Bahners_GB _____	89
Abbildung 59: Annotierte Grafiken als Beispiele für das Leseverständnis. Vergleich der Gesamtkosten zweier Technologien und deren Sensitivität gegenüber Energiepreisen _____	91
Abbildung 60: Sensitivität der Energiepreise für urbane Einsatzprofile _____	92
Abbildung 61: Sensitivität der Energiepreise für regionale Einsatzprofile _____	93

Abbildung 62: Annotierte Grafiken als Beispiele für das Leseverständnis. Vergleich der indexierten Gesamtkosten über alle Einsatzprofile hinweg und deren Sensitivität gegenüber einem Sensitivitätsparameter _____	94
Abbildung 63: Sensitivität des Wasserstoffverbrauchs H ₂ -ICE _____	95
Abbildung 64: Sensitivität der Anschaffungskosten _____	96
Abbildung 65: Sensitivität der Wasserstoffinfrastrukturkosten _____	97
Abbildung 66: Sensitivität des Batterieersatzes _____	97
Abbildung 67: Anteil der Fahrzyklen nach Längsneigung _____	124
Abbildung 68: Energieverbrauch nach Durchschnittsgeschwindigkeit und Längsneigung _____	130

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Konzepte für Wasserstoffverbrennungsmotoren _____	16
Tabelle 2: Antriebstechnologien im Vergleich _____	25
Tabelle 3: Bussgrössen und Einsatzprofile im Vergleich _____	27
Tabelle 4: Allgemeine Linienkennzahlen der Einsatzprofile _____	30
Tabelle 5: Eckdaten zu Diesel-Hybridbus (Euro 7) in den Einsatzprofilen _____	36
Tabelle 6: Eckdaten zu Wasserstoffverbrennerbus in den Einsatzprofilen _____	36
Tabelle 7: Eckdaten zu Brennstoffzellenbus in den Einsatzprofilen _____	37
Tabelle 8: Eckdaten zu Batteriebus (rasche Batterieentwicklung) in den Einsatzprofilen _____	38
Tabelle 9: Eckdaten zu Batteriebus (langsame Batterieentwicklung) in den Einsatzprofilen _____	39
Tabelle 10: Allgemeine Annahmen für alle Einsatzprofile _____	44
Tabelle 11: Annahmen Batterieelektrischer Bus (langsame Batterieentwicklung oben, rasche Batterieentwicklung unten) _____	45
Tabelle 12: Annahmen Brennstoffzellenbus (oben), Wasserstoffverbrennungsbuss (Mitte) und Diesel-Hybridbus (unten) _____	46
Tabelle 13: Allokationsfaktoren für zweites Leben der Batterien _____	80
Tabelle 14: Internationale Förderungsstellen _____	118
Tabelle 15: Forschungseinrichtungen mit Beteiligung an Demonstrationsprojekten _____	119
Tabelle 16: Öffentlich geförderte Forschungsprojekte _____	120
Tabelle 17: Übersicht der Interviews _____	122
Tabelle 18: Linientyp und Verkehrssituationsverteilung _____	124
Tabelle 19: Zusammensetzung der Einsatzprofile aus Verkehrssituationen in HBEFA _____	125
Tabelle 20: Energieverbrauch und Emissionen in OV_SB_HVZ-V gemäss HBEFA _____	132
Tabelle 21: Energieverbrauch und Emissionen in OV_GB_Int gemäss HBEFA _____	133
Tabelle 22: Energieverbrauch und Emissionen in RV-M_GB_Int gemäss HBEFA _____	133
Tabelle 23: Energieverbrauch und Emissionen in RV_B_SB_Int gemäss HBEFA _____	133
Tabelle 24: Energieverbrauch und Emissionen in Bahners_GB_Int gemäss HBEFA _____	134
Tabelle 25: Energieverbrauchsvergleich mit anderen Studien _____	135

Glossar

BAV	Bundesamt für Verkehr
BEV	batterieelektrisches Fahrzeug (englisch: Battery Electric Vehicle)
BFE	Bundesamt für Energie
BTE	Brake Thermal Energy
CI	Kompressionszündung oder Selbstzündung (englisch: Compression Ignition)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CNG	komprimiertes Erdgas (englisch: Compressed Natural Gas)
DHEV	Diesel-Hybrid Fahrzeug (englisch: Diesel Hybrid Electric Vehicle)
EP2050+	Energieperspektiven 2050+
GWP	Global Warming Potential
GWP100	Global Warming Potential mit Zeithorizont von 100 Jahre
H ₂	Wasserstoff
H2ICE	Wasserstoffverbrenner-Fahrzeug
HBEFA	Handbook Emission Factors for Road Transport (Software INFRAS)
HKL	Heizen / Klima Leistung
HPDI	Hochdruck-Direkteinspritzung (englisch: High Pressure Direct Injection)
HVO	Hydrierte Pflanzenöle (englisch: Hydrotreated Vegetable Oils)
HVZ	Hauptverkehrszeiten
ICE	Verbrennungsmotor (englisch: Internal Combustion Engine)
LCA	Lebenszyklusanalyse, auch Ökobilanz (englisch: Life Cycle Assessment)
LCI	Lebenszyklus-Inventar, auch Sachbilanz (englisch: Life Cycle Inventory)
LCIA	Lebenszyklus-Wirkungsabschätzung (englisch: Life Cycle Impact Assessment)
LKW	Lastkraftwagen
LNG	verflüssigtes Erdgas (englisch: Liquefied Natural Gas)
LNT	NO _x -Speicherkatalysator (englisch: Lean NO _x Trap)
LPDI	Niederdruck-Direkteinspritzung (englisch: Low Pressure Direct Injection)
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxide, umfasst NO und NO ₂
OV	Ortsverkehr
PFI	Saugrohreinspritzung (englisch: Port Fuel Injection)
PHEM	Passenger car and Heavy duty Emission Model (Software der TU Graz)
PKW	Personenkraftwagen

PM	Schwebestaub (englisch: Particulate Matter)
PM10	Feinstaub mit Durchmesser unter 10 µm
RBS	Regionalverkehr Bern-Solothurn
RV	Regionalverkehr
RPV	Regionaler Personenverkehr
SB	Standardbus
SCR	Selektive katalytische Reduktion (englisch: Selective Catalytic Reduction)
SI	Funkenzündung oder Fremdzündung (englisch: Spark Ignition)
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SO ₂	Schwefeldioxid
TCO	Gesamtkosten des Betriebs (englisch: Total Cost of Ownership)
THP	Treibhauspotenzial
TPF	Freiburgische Verkehrsbetriebe (französisch: Transports publics fribourgeois)
TTW	Tank to Wheel
UBP	Umweltbelastungspunkte
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
FC	Brennstoffzelle (englisch: Fuel Cell)
FCEV	Brennstoffzellen-Fahrzeug (englisch: Fuel Cell Electric Vehicle)
GB	Gelenkbus
ZERO	Szenario Netto-Null aus den Energieperspektiven 2050+
ZEV	emissionsfreies Fahrzeug (englisch: Zero Emission Vehicle)

Literatur

- Alger 2023:** H2-Ice-A Zero-Impact Bridge to a Zero Emissions Future. Gehalten auf: Workshop on the Role of Hydrogen in California's Medium- and Heavy-Duty Vehicle Fleet. 28. November, 2023.
- Althaus u. a. 2009a:** 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 u. a. 2009b:** 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.
- Amtsblatt der Europäischen Union 2024:** Verordnung (EU) 2024/1610 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Mai 2024 zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1242 im Hinblick auf die Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und die Einbeziehung von Meldepflichten, zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/858 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) 2018/956, 2024. Online: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1610/oj>.
- ASTAG 2025:** Dieselpreise - Treibstofftabelle nationale Transporte 2025. Abgerufen am 04. September 2025. <https://www.astag.ch/fileadmin/Files/Dokumente/01-Wissen/02-Betriebswirtschaft/Dieselpreise/Tabelle-National-2025-KW35.pdf>
- Arnberger u. a. 2021:** Der Wasserstoffmotor im Nfz: Brückentechnologie oder langfristige Lösung? Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021. doi:10.1007/978-3-658-35588-3_18. Online: https://link.springer.com/10.1007/978-3-658-35588-3_18 (zugegriffen: 28. November 2024).
- Avenergy 2025:** Dieselpreis im Monats- und Jahresmittel. <https://www.avenergy.ch/de/preise-statistiken/preise/diesel-monatsmittel-und-jahresmittel> (zugegriffen: 16. Juli 2025).
- AVL u. a. 2021:** Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug: Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte, 2021. Online: https://www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/e-mobilBW-Studie_H2-Systemvergleich.pdf.
- AVL 2024:** Commercial Hydrogen Engine with 50% BTE. 03. September, 2024. Online: <https://www.avl.com/en/expert-article/commercial-hydrogen-engine-50-bte>.
- BAFU 2021:** Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2021.

- Balduyck 2014:** Blue Planet Hydrogen gelooft in waterstof. 28. März, 2014. Online: <https://www.made-in.be/antwerpen/blue-planet-hydrogen-gelooft-in-waterstof/> (zugegriffen: 13. Mai 2025).
- Bartel 2023:** Volvo Group Trucks H2 ICE. Gehalten auf: Workshop on the Role of Hydrogen in California's Medium- and Heavy-Duty Vehicle Fleet. Virtuell. 28. November, 2023. Online: <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2023-12/231128volvopres.pdf>.
- Berliner Verkehrsbetrieb 2015:** Clean Energy Partnership – CEP Phase II Weiterbetrieb von vier Bussen mit Wasserstoffverbrennungsmotoren. 31. Januar, 2015. Online: <https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A862405351/Clean-Energy-Partnership-CEP-Phase-II-Weiterbetrieb/>.
- Blanco 2008:** Two Ford hydrogen H2ICE buses arrive at Detroit Metro airport. 17. März, 2008. Online: <https://www.autoblog.com/news/two-ford-hydrogen-h2ice-buses-arrive-at-detroit-metro-airport>.
- BFE 2020:** Lebküchner M., Althaus H.J., Greinus A. Graf C., Cox B. Köppel S. (2020) Abschätzung des Einsatz- und CO₂-Reduktionspotenzials durch Busse mit nicht fossilen Antriebstechnologien und Fördermöglichkeiten. INFRAS-Grundlagestudie zum Postulatsbericht 19.3000. Bern, 2020. BFE / BAV.
- BFE 2022a:** Stromspeicherung und Wasserstoff – Technologien, Kosten und Auswirkungen auf das Klima. Einschliesslich Aufdatierung der Kosten und Potenziale von Photovoltaik und Windenergie. Bern, 2022. <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/11088>
- BFE 2022b:** Technischer Bericht. Bern, 2022. Online: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTExNDM=.html>.
- BFE 2022c:** Exkurs Wasserstoff: Hintergrund zum Einsatz in den Szenarien der Energieperspektiven 2050+. Bern, 2022. Online: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTA3ODM=.html>.
- BFE 2025:** Umweltrechner Verkehr. EnergieSchweiz. Online: <https://www.energieschweiz.ch/programme/umweltrechner-verkehr/>.
- BAV 2022a:** Motorisation à l'hydrogène des bus de transport public. Projekt P-155. Bern: Bundesamt für Verkehr BAV, 2022. Online: <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=70312>.
- BAV 2022b:** Etude du potentiel de l'hydrogène dans les transports publics. Projekt P-199. Bern: Bundesamt für Verkehr BAV, 2022. Online: <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=70304>.

- BAV 2023:** Développement d'un moteur à combustion hydrogène pour bus de transports publics. Projekt P-255. <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=51645>.
- BAV 2024:** Wasserstoff auf Bahnbaustellen: Eine techno-ökonomische Einordnung für die Schweiz. Projekt P-214. Bern: Bundesamt für Verkehr BAV, 2024. Online: <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=72701>.
- Cespira 2024:** HPDI H2, 2024. Online: <https://cespira.com/our-technology/hpdi-h2/> (zugegriffen: 13. Mai 2025).
- Cobino 2023:** IPCEI Hy2Tech project TF2/TF4 - Wave 2 the Future. Gehalten auf: IPCEI Hydrogen 2nd General Assembly. Berlin. 6. Dezember, 2023.
- Comyu 2009:** The 1st of hydrogen-powered bus in Japan, developed by Tokyo City University (ex. Musashi Institute of Technology) and Hino Motors. 25. November, 2009. Online: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tokyo-City-University_Liesse_Hydrogen-Bus.jpg.
- Cummins Inc. 2022:** Cummins präsentiert auf der IAA-Expo einen kohlenstofffreien H2-ICE Concept Truck mit B6.7H-Wasserstoffmotor. 13. September, 2022. Online: <https://www.cummins.com/de/news/releases/2022/09/13/cummins-reveal-zero-carbon-h2-ice-concept-truck-iaa-expo-powered-b67h> (zugegriffen: 13. Mai 2025).
- DAF 2025:** Wasserstoff - Eine interessante Option für die Zukunft, 2025. Online: <https://www.daf.ch/de-ch/lkw/alternative-kraftstoffe-und-antriebsstrange/hydrogen> (zugegriffen: 13. Mai 2025).
- Daimler Truck AG 2023a:** Der Unimog macht Welle. Mai, 2023. Online: <https://special.mercedes-benz-trucks.com/de/unimog/unimog-news/unimog-news-052023.html> (zugegriffen: 13. Mai 2025).
- Daimler Truck 2023b:** H2-ICE Overview - Daimler Truck Powertrain Development. Nov, 2023. Virtueller Vortrag auf dem Workshop on the Role of Hydrogen in California's Medium- and Heavy-Duty Vehicle Fleet. <https://www.youtube.com/watch?v=upSb0Cg065I&t=5006s>
- De Smet 2017:** Hoe zou het zijn met het waterstofproject van Colruyt Group? Online: <https://engineeringnet.be/nl/nieuws/item/12169/ho-zou-het-zijn-met-het-waterstofproject-van-colruyt-group-artikel> (zugegriffen: 13. Mai 2025).
- DEUTZ AG 2024:** It's on the road! Together with its development partners IAV GmbH and Paul Nutzfahrzeuge, DEUTZ has put the first of two HyCET trucks with DEUTZ TCG 7.8 H2 hydrogen engines into operation. 2024. Online: https://www.linkedin.com/posts/deutzofficial_its-on-the-road-together-with-its-development-activity-7208834279080951808-lxc6.
- ElCom 2025:** Strompreise Schweiz. <https://www.strompreis.elcom.admin.ch/>
- European Commission, Joint Research Centre 2024:** Historical analysis of Clean Hydrogen JU Fuel Cell Electric Vehicles, Buses and Refuelling Infrastructure Projects: Evaluation of Contribution towards the State of the Art. Luxembourg: Publications Office of the European

- Union, 2024. Online: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/892745> (zugegriffen: 18. November 2024).
- FCH 2 JU 2018:** Addendum to the Multi - Annual Work Plan 2014 - 2020, 2018. Online: https://www.clean-hydrogen.europa.eu/document/download/29a7bd1b-5c19-4202-8fd2-dbfad804c6bf_en?filename=MAWP%20final%20version_endorsed%20GB%2015062018%20%28ID%203712421%29.pdf (zugegriffen: 14. Mai 2025).
- Fortenbach 2023:** Bosch IPCEI Project - AT13 HCCELEA. Gehalten auf: IPCEI Hydrogen 2nd General Assembly. Berlin. 6. Dezember, 2023.
- Fraunhofer ISI 2023:** Lithium-Ion Battery Roadmap - Industrialization Perspectives toward 2030. Online: <https://doi.org/10.24406/publica-2153>.
- Grabner 2009:** Potentiale eines Wasserstoffmotors mit innerer Gemischbildung hinsichtlich Wirkungsgrad, Emissionen und Leistung, 2009.
- Gruber u. a. 2002:** 250.000 Kilometer im Wasserstoffbetrieb - Wasserstoffbusse als Wegbereiter für die zukünftige Verkehrswirtschaft, September, 2002. Online: https://hydrogeit.de/wp-content/uploads/2015/06/s_6-8.pdf.
- H2 MOBILITY 2025:** H2 tanken: Wasserstoffmobilität beginnt jetzt. Online: <https://h2.live/>. (Zugegriffen: 15 Juli 2025).
- HBEFA 2025:** Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs, Version 5.1. INFRAS, Bern 2025. Online: <https://www.hbefa.net>.
- Hergart 2023:** PACCAR Perspectives on H2-ICE. Gehalten auf: Workshop on the Role of Hydrogen in California's Medium- and Heavy-Duty Vehicle Fleet. 28. November, 2023.
- Hoffmann 2023:** Westport Wasserstoff-Motor: Wie ein Diesel, nur anders. 30. Januar, 2023. Online: <http://www.eurotransport.de/fahrer/bkf-news/westport-wasserstoff-motor-wie-ein-diesel-nur-anders/> (zugegriffen: 13. Mai 2025).
- Hydrogen Delivery Council 2024:** Powering Growth: The role of hydrogen internal combustion engines in non-road mobile machinery. Online: https://www.apcuk.co.uk/wp-content/uploads/2024/11/H2ICE-Task-and-Finish-Group-Report-Content_Oct-2024_final.pdf (zugegriffen: 15. August 2025).
- ICCT 2023:** A comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of European heavy-duty vehicles and fuels. February 2023. Online: https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/Lifecycle-assessment-EU-HDVs_final2.pdf
- INFRAS 2025:** Technologiestudie Elektrobusse 2025. Verband öffentlicher Verkehr (VöV), Zürich, 2025.
- ISO 2006a:** Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework (ISO Standard No. 14040:2006). International Organization for Standardization. Juli, 2006. Online: <https://www.iso.org/standard/37456.html>

- ISO 2006b:** Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (ISO Standard No. 14044:2006). International Organization for Standardization. Juli, 2006. Online: <https://www.iso.org/standard/38498.html>
- Itten et al. 2014:** Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and Grid, Version 1.3. Juli 2014.
- JCB 2024:** Hydrogen, 2024. Online: <https://www.jcb.com/en-gb/campaigns/hydrogen> (zugegriffen: 13. Mai 2025).
- KEYOU GmbH 2023a:** Der Wasserstoffmotor als moderne und effiziente Antriebstechnologie für Nutzfahrzeuge, 2023. Online: https://www.mainz.de/microsite/klimaneutral/medien/bindata/wasserstoffthema/MaHYnzExperts_Vortrag_Nadler_KEYOU_for_Mainz.pdf
- KEYOU GmbH 2023b:** Smart. Simple. Sustainable., 2023. Online: <https://keyou.de/de/solutions> (zugegriffen: 13. Mai 2025).
- Kreso 2023:** H2-ICE Overview - Daimler Truck Powertrain Development. Gehalten auf: Workshop on the Role of Hydrogen in California's Medium- and Heavy-Duty Vehicle Fleet. 28. November, 2023. Online: <https://www.youtube.com/watch?v=upSb0Cg065I>.
- Liebherr 2022:** Liebherr-Raupenbagger mit Wasserstoffmotor feiert Weltpremiere. 23. Oktober, 2022. Online: <https://www.liebherr.com/de-ch/n/liebherr-raupenbagger-mit-wasserstoffmotor-feiert-weltpremiere-27130-3902502> (zugegriffen: 13. Mai 2025).
- MAN 2024:** Wasserstoffbusse: Alternative mit Tradition, 2024. Online: <https://www.man.eu/engines/de/im-fokus/engines/wasserstoffbusse-alternative-mit-tradition-128384.html>.
- MAN Engines 2023:** MAN Engines stellt wegweisenden Wasserstoffverbrennungsmotor für Off-road-Anwendungen vor. 10. November, 2023. Online: <https://press.man-truckandbus.com/corporate/de/man-engines-stellt-wegweisenden-wasserstoffverbrennungsmotor-fuer-offroad-anwendungen-vor/>.
- McKinsey & Company 2021:** Florida opens hydrogen station for shuttle fleet. Mai, 2007. Online: <https://www.nbcnews.com/id/wbna18826056>.
- Mobitool 2023:** Mobitool-Faktoren v3.0. Die Excel-Datenbank mit aufbereiteten ecoinvent-Umweltdaten und Emissionsfaktoren (Update 2023). <https://www.mobitool.ch/de/tools/mobitool-faktoren-v3-0-25.html?tag=18>
- Monney et al. 2024:** Hydrogen engine for buses – a highly competitive CO₂-neutral solution which could be quickly implemented. Internationaler Motorenkongress 2023. Proceedings. https://doi.org/10.1007/978-3-658-44982-7_20
- Mulholland:** The revised CO₂ standards for heavy-duty vehicles in the European Union.
- NBC News 2007:** Wasserstoffverbrennungsmotor als alternative Antrieb: Metastudie, 2021.

- NOW GmbH 2021:** Wasserstoffverbrennungsmotor als alternative Antrieb: Metastudie, 2021.
Online: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/10/NOW_Metastudie_Wasserstoff-Verbrennungsmotor.pdf
- NREL 2024:** 2024 Transportation Annual Technology Baseline: Comparison of MDHD Vehicles.
Online: https://atb.nrel.gov/transportation/2024/comparison_of_mdhd_vehicles
- Office of the Minister of Natural Resources Canada 2007:** Environment Minister Baird Opens Ottawa's First Hydrogen Fuelling Station. 14. Oktober, 2007. Online: <https://www.canada.ca/en/news/archive/2007/10/environment-minister-baird-opens-ottawa-first-hydrogen-fuelling-station.html>.
- Oh et al. 2022:** Analysis of the exhaust hydrogen characteristics of high-compression ratio, ultra-lean, hydrogen spark-ignition engine using advanced regression algorithms. Oktober 2022. Online: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119036>
- PHEM 2025:** Passenger car and Heavy duty Emission Model. Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme, Softwarestand 13.0. Technische Universität Graz. Online: <https://itna.tugraz.at/forschung/bereiche/em/simulation/phem.html>
- Prinoth 2025:** Wasserstoff-Verbrennungsmotor, 2025. Online: https://interactive-presentation.prinoth.com/de/sustainable-snow-grooming_sgeu/overview/clean-motion/leitwolf-h2motion/hydrogen-ice (zugegriffen: 13. Mai 2025).
- Puran u. a. 2022:** Hydrogen combustion engine with active prechamber (APC) technology, 2022.
- Rathmann 2022:** BMW, Deutz, Keyou, Volvo, DHL, Total: Test mit Wasserstoff-Verbrennern. 5. Oktober, 2022. Online: <http://www.eurotransport.de/logistik/spedition-und-logistik/bmw-deutz-keyou-volvo-dhl-total-test-mit-wasserstoff-verbrennern/> (zugegriffen: 13. Mai 2025).
- Sand u. a. 2023:** A multi-model assessment of the Global Warming Potential of hydrogen. 7. Juni, 2023. doi:10.1038/s43247-023-00857-8.
- Sari et al. 2024:** Techno-economic assessment of hydrogen as a fuel for internal combustion engines and proton exchange membrane fuel cells on long haul applications, 2024. Online: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118522>
- Strategy& 2024:** Truck Study 2024. PwC, September, 2024. Online: <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/transport/truck-study/2024/strategyand-truck-study-2024.pdf>.
- Soltic u. a. 2024:** H2-DI Hydrogen Direct Injection Combustion Process, 2024.
- Southwest Research Institute 2025:** SwRI's H2-ICE consortium launches second phase, H2-ICE2, 2025. Online: <https://www.swri.org/newsroom/press-releases/swri-s-h2-ice-consortium-launches-second-phase-h2-ice2> (zugegriffen: 13. Mai 2025).

- Köllner 2025:** Konzepte für die H₂-Einblasung im Überblick. Springer Professional. Mai 2025.
Online: <https://www.springerprofessional.de/gemischbildung---verbrennung/motoren-technik/konzepte-fuer-die-h2-einblasung-im-ueberblick/26487578> .
- Srna 2023a:** Is there a place for H₂ internal combustion engines? Gehalten auf: H₂IQ Hour: Overview of Hydrogen Internal Combustion Engine (H₂ICE) Technologies. Virtuell. 22. Februar, 2023. Online: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/february-h2iq-hour-overview-hydrogen-internal-combustion-engine-h2ice-technologies>.
- Srna 2023b:** The future of H₂ internal combustion engines in California? Gehalten auf: Workshop on the Role of Hydrogen in California's Medium- and Heavy-Duty Vehicle Fleet. 28. November, 2023.
- TU Graz 2025:** Kurzdoku Emissionsfaktoren für Wasserstoffbusse. Februar 2025.
- UC Davis 2024:** A Comparative Review of Hydrogen Engines and Fuel Cells for Trucks. 9. August, 2024. Online: <https://escholarship.org/uc/item/4bn4r7td>.
- Vijayagopal 2023:** H₂ICE Impact on Medium and Heavy Duty Truck Applications. Gehalten auf: Workshop on the Role of Hydrogen in California's Medium- and Heavy-Duty Vehicle Fleet. 28. November, 2023.
- Zimmerer et al. 2023:** Comparison of fuel cell with battery electric bus systems against operational, economic and environmental parameters. JIVE and JIVE 2, May 2023. Online: https://fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/Deliverables_JIVE%20D3.22_%20JIVE2%20D3.6_D4.3_final.pdf

Annex

A1. H₂-Verbrennungsantrieb: Begriffsdefinitionen

Verbrennungsmotoren

Verbrennungsmotoren wandeln die chemische Energie eines Kraftstoffs in mechanische Energie um. Dies geschieht durch die Verbrennung eines Kraftstoff-Luft-Gemisches in einem Brennraum, der über Kolben und Kurbelwelle mit dem mechanischen Antrieb gekoppelt ist. Die Wärme, die während der Verbrennung entsteht, geht über Kurbelgehäuse-Wände und Abgase verloren.

Diesel- und Ottomotorprinzip

Verbrennungsmotoren umfassen unterschiedliche Konzepte. In LKW wird am häufigsten das Dieselmotorprinzip verwendet. In PKW kommt hingegen das Ottomotorprinzip mit Benzin als Treibstoff am häufigsten vor. In beiden Fällen wird der flüssige Treibstoff durch die Einspritzung zerstäubt und verteilt. Die Anwendung von Gasmotoren ist für Treibstoffe, die unter Normalbedingungen gasförmig sind – wie Erdgas (CNG) und Wasserstoff – auch möglich. CNG-Motoren werden seit rund 20–30 Jahren entwickelt und setzen sowohl in LKW als auch in PKW am häufigsten das Ottomotorprinzip ein.

PFI, LPDI und HPDI

Die Gemischbildung beschreibt den Entstehungsprozess des Kraftstoff-Luft-Gemisches. Bei der äusseren Gemischbildung wird der Kraftstoff in einem Trakt vor dem Brennraum eingespritzt und mit Luft gemischt. Durch das Öffnen des Einlassventils und Abwärtsbewegung des Kolbens wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch in dem Brennraum angesaugt. Dieses Verfahren nennt sich Saugrohreinspritzung (Port Fuel Injection, PFI). Bei der inneren Gemischbildung wird zunächst die Luft in den Brennraum angesaugt, bevor der Kraftstoff direkt in den Brennraum eingespritzt wird. Dieses Verfahren nennt sich auch Direkteinspritzung. Wird der Kraftstoff früh in dem Verdichtungs-Trakt eingespritzt, ist der Luftdruck im Brennraum und der erforderliche Einspritzdruck niedriger (Low Pressure Direct Injection, LPDI). Erfolgt die Einspritzung erst kurz vor der Zündung, steigt der erforderliche Druck (High Pressure Direct Injection, HPDI). Dieselmotoren verwenden ausschliesslich die innere Gemischbildung. Ottomotoren verwenden üblicherweise die Saugrohreinspritzung, jedoch zunehmend die Direkteinspritzung.

Zündverfahren

Das Zündverfahren beschreibt die Einleitung der Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches. Dieses erfolgt entweder durch die Anwendung einer Zündhilfe (Fremdzündung) oder ohne (Selbstzündung). Ottomotoren setzen auf Fremdzündung mithilfe von Zündkerzen (Spark Ignition), Dieselmotoren setzen die Selbstzündung durch Kompression der Luft um (Compression Ignition).

Luftverhältnis

Der Betrieb eines Motors wird durch das Luftverhältnis beschrieben. Nach Annahme des Sauerstoffgehalts in der Luft wird ein Verhältnis zwischen der Luftmasse und der Kraftstoffmasse festgelegt, das stöchiometrische Verbrennungsluftverhältnis ($\lambda = 1$). Luftverhältnisse, die von diesem Verhältnis abweichen, sind auch zündbar, solange sie innerhalb den Zündgrenzen eines Kraftstoffs liegen. Wird mehr Luftmasse als benötigt eingeführt ($\lambda > 1$), redet man von einem mageren Betrieb. Aufgrund der resultierenden niedrigen Temperatur sinken NO_x -Emissionen und Wärmeverluste. So kann die Effizienz des Motors gesteigert werden, während die Leistung nachlässt. Wird mehr Kraftstoffmasse als benötigt eingespritzt ($\lambda < 1$), redet man von einem fetten Betrieb. Dieselmotoren werden grundsätzlich mager betrieben. Ottomotoren fahren stöchiometrisch, können aber bei niedrigen oder hohen Lasten jeweils mager oder fett fahren.

A2. Übersicht Forschung

Tabelle 14: Internationale Förderungsstellen

Land	Förderungsquelle	Fokus
EU	Horizon 2020	Forschung & früherer Einsatz
EU	Horizon Europe	Forschung & früherer Einsatz
CH	BAV	Forschung
CH	BFE	Forschung
DE	BMDV	Forschung
DE	BMWK	Forschung
DE	FVV	Forschung
FR	ADEME	Forschung
FR	CORAM	Forschung
EU	IPCEI Hy2Tech	Industrialisierung
EU	IPCEI Hy2Move	Industrialisierung
CH	Innosuisse	Industrialisierung
US	DOE Vehicle Technologies Office	Industrialisierung
UK	Advanced Propulsion Centre	Industrialisierung

Tabelle INFRAS.

Tabelle 15: Forschungseinrichtungen mit Beteiligung an Demonstrationsprojekten

Land	Universität	Institut	Link
CH	HEIA-FR	Sustainable engineering systems institute	SeSi
CH	FHNW	Institut für Thermo- und Fluid-Engineering	ITFE
CH	HES-SO	Haute école d'Ingénierie et d'Architecture	
AT	TU Graz	Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme	ITnA
DE	Karlsruhe Institute of Technology	Engler-Bunte-Institut, Chair of Combustion Technology	EBI
DE	Rheinland-Pfälzische Technische Universität	Lehrstuhl für Antriebe in der Fahrzeugtechnik	LAF
DE	RWTH Aachen	Lehrstuhl für Thermodynamik mobiler Energiewandlungssysteme	TME
DE	Universität Stuttgart	Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart	IFS
FR	Université d'Orléans	Laboratoire PRISME	PRISME
KR	Seoul National University	Automotive Laboratory	SNUAL
NL	Eindhoven University of Technology	Power & Flow	Power & Flow
SE	Chalmers University of Technology	Energy Conversion and Propulsion Systems	ECaPS
UK	University of Bath	IAAPS: Propulsion and Mobility	IAAPS
US	University of Wisconsin Madison	Engine Research Center	ERC
CA	University of British Columbia	Clean Energy Research Centre	CERC
Land	Forschungszentrum	Abteilung	Link
CH	Empa	Chemische Energieträger und Fahrzeugsysteme	504
DE	Fraunhofer IGP	Anwendungszentrum Wasserstoff	
US	Sandia National Laboratories	Engine Combustion	Sandia
US	Argonne National Laboratory	Vehicle Technology Assessment	ANL
US	Southwest Research Institute	Sustainable Energy and Mobility	SwRI

Tabelle INFRAS.

Tabelle 16: Öffentlich geförderte Forschungsprojekte

Land	Förderungs- stelle	Projekt- nummer	Projekttitel	Techno- logie	Anwendung	Start	Ende	Gesamtkosten	Link
EU	IPCEI Hy2Tech	IT13	Wave 2 the Future	FC, ICE	Schifffahrt	22.03.23			Link
EU	IPCEI Hy2Tech	AT13	Hydrogen, Carbon-free and Carbon- neutral Fuel Enabled Large Engine Ap- plications	ICE	Schifffahrt, Off- Highway, Schienen, Kraft	01.09.21	01.09.26		Link
EU	Horizon 2020	953629	Sustainable. Clean. Uncompromising. The Internal Combustion Engine Be- comes Green	ICE	LKW	01.09.20	31.08.22	€ 2'191'254	Link
EU	FP6	19991	Hydrogen for clean urban transport in Europe	FC, ICE	Bus	10.01.06	09.09.09	€ 43'037'049	Link
CH	BFE	SI/502839	Experimental and numerical investiga- tions of mixture formation in H2 en- gines using PFI and DI	ICE	Grundforschung	01.10.24	01.03.28	CHF 110'000	Link
CH	BFE	SI/502841	Hydrogen High-Pressure Direct Injec- tion Jet-Guided Combustion Processes for High-Efficiency heavy-Duty Vehicles	ICE	SNF, Grundforschung	01.08.24	31.07.27	CHF 125'307	Link
CH	BAV	255	Development of a hydrogen engine for public transport buses	FC, ICE	Bus	14.11.22	31.12.24	CHF 644'203	Link
CH	BFE	SI/502205-01	Hydrogen Direct Injection Combustion Process	ICE	SNF, Grundforschung	01.05.21	30.11.23		Link
CH	BFE	SI/502082	Stoichiometric H2-engine with EGR	ICE	Stationär, Grundfor- schung	01.09.20	31.07.21	CHF 49'800	Link
CH	BAV	199	Etude potentiel H2 dans les transports publics	FC, ICE	Bus	07.07.20	31.01.22	CHF 165'165	Link
CH	BAV	155	Motorisation à l'hydrogène des bus de transport public	FC, ICE	Bus	09.12.19	31.12.23	CHF 486'472	Link

CH	BFE	SI/501980	New combustion process for hydrogen engine (Multi Jet Ignition)	ICE	Off-Highway, Grundforschung	01.11.19	30.11.22	CHF 288'428	Link
AT	COMET		Research into Competitive and Practical Heavy Duty Hydrogen Engines	ICE	SNF, Grundforschung	01.01.24	31.12.27		Link
AT	IWI		Hydrogen Injection, Port Fuel Injection Valve 2	ICE	SNF, Grundforschung	01.10.23	30.09.24		Link
AT	IWI		Hydrogen Injection, Port Fuel Injection Valve	ICE	SNF, Grundforschung	07.10.22	30.09.23		Link
DE	FVV	FVV1528	Sustainable Mobile Propulsion 2035+	ICE	PKW, Schifffahrt, Off-Highway	01.10.24	30.09.26		Link
DE	BMDV		Hydrogen Combustion Engine Trucks	ICE	LKW	01.09.22	01.01.26	€ 19'500'000	Link
DE	FVV	FVV1449	Near-zero Emission Concept for H2 DI Otto Engines	ICE	PKW	01.10.21	01.03.25		Link
DE	BMWK		Wasserstoff-Verbrennungsmotor	ICE	Geräteträger	01.06.21	01.06.24	€ 23'400'000	Link
DE	StMWi Bayern		Zwölf-Meter-Stadtbus mit Wasserstoffmotor	ICE	Bus	01.09.20	14.11.23	€ 2'500'000	Link

Tabelle INFRAS.

A3. Durchgeführte Interviews

Tabelle 17: Übersicht der Interviews

Gesprächsbeteiligte	Institution	Datum
Fabian Ruppen	Renault Trucks	11.11.2024
Michel Sobert	Scania Schweiz AG	13.11.2024
Claudio Ferretti	Volvo Group Schweiz AG	13.11.2024
Reto Job	DAF Trucks Schweiz AG	14.11.2024
Dr. Patrik Soltic	Empa	15.11.2024
Dr. Peter Grabner Prof. Dr. Stefan Hausberger	TU Graz	19.11.2024
Prof. Dr. Kai Hermann	FHNW	21.11.2024
Prof. Christian Nellen	HEIA-FR	22.11.2024
Marc Achermann	Daimler Truck Schweiz AG	Schriftlich (E-Mail)

Tabelle INFRAS.

A4. Energiebedarf und Emissionen in den Einsatzprofilen

Energiebedarf- und Emissionsberechnungen in PHEM

Mithilfe der PHEM-Methodik wurden Verbrauchswerte in Abhängigkeit von Antriebstyp, Fahrzeuggrösse, Verkehrssituation und Längsneigung berechnet. Die Simulation der Fahrzeugdynamik liefert die erforderliche Antriebsleistung und Motordrehzahl unter Berücksichtigung von Steigung, Beschleunigung, Luft- und Rollwiderstand. Anhand des Wirkungsgradkennfelds des Motors sowie des Verlustkennfelds von Getriebe und Achse kann der spezifische Energieverbrauch am jeweiligen Betriebspunkt berechnet werden. Dieser Wert wird mit dem Leistungsbedarf der Nebenaggregate summiert. Über den gesamten Fahrzyklus der jeweiligen Verkehrssituation wird daraus der durchschnittliche Energieverbrauch und die durchschnittlichen Emissionsfaktoren ermittelt.

Im Rahmen dieses Projekts wurden ein Standardbus und ein Gelenkbus mit Wasserstoffverbrennungsmotor (H₂-ICE) von der TU Graz in die PHEM-Software integriert. Grundlage hierfür waren Messdaten eines eigens von der TU Graz entwickelten H₂-Forschungsmotors. Es handelt sich um einen SNF-Motor mit sechs Zylindern und 13 Litern Hubraum, der nach dem Prinzip der Saugrohreinspritzung (PFI) mager ($\lambda \geq 2$) betrieben wird. Um den Stand der Technik für das Jahr 2030 abzubilden, wurde der gemessene Spitzenwirkungsgrad von 42% auf 44% im PHEM-Modell erhöht (Der Spitzenwirkungsgrad bei vergleichbaren Dieselmotoren in PHEM liegen bei ca. 48%). Da die gemessenen NO_x-Rohemissionen des Forschungsmotors die Grenzwerte der EURO-7-Norm überschreiten, wurde auch ein Abgasnachbehandlungssystem bestehend aus einem SCR-Katalysator und einem Dieselpartikelfilter (DPF) in PHEM modelliert.³⁰

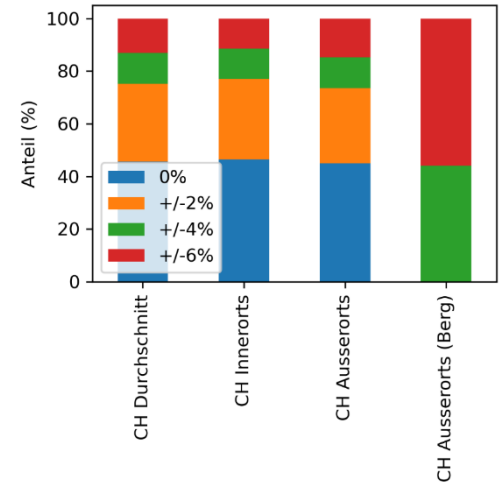
Verkehrssituationsverteilungen

Der Energiebedarf und die Emissionsfaktoren wurden für 365 Verkehrssituationen und sieben Längsneigungen im PHEM modelliert. Anschliessend wurde für alle Einsatzprofile ein Durchschnitt berechnet, gewichtet nach der Häufigkeit der jeweiligen Verkehrssituation (eine sogenannte Verkehrssituationsverteilung). Als Basis für die Verkehrssituationsverteilungen der Einsatzprofile wurden die Schweizer Durchschnittsverteilungen verwendet. Diese wurden leicht angepasst, sodass die Durchschnittsgeschwindigkeit aus der gewichteten PHEM-Verkehrssituation der Durchschnittsgeschwindigkeit des Einsatzprofils (Tabelle 4) entsprach.

³⁰ Es ist derzeit unklar, ob die NO_x-Rohemissionen eines serienreifen H₂-Motors die EURO-7-Grenzwerte überschreiten würden. In unserer Analyse spielt dies jedoch eine untergeordnete Rolle, da in der Ökobilanz ausschliesslich die Abgasemissionen nach der Abgasnachbehandlung berücksichtigt werden. Die modellierte SCR-Abgasnachbehandlung führt zu einem leicht erhöhten Kraftstoffverbrauch, dieser liegt jedoch innerhalb der Unsicherheiten, die sich aus der Annahme eines zukünftigen Spitzenwirkungsgrads ergeben.

Es wurden vier Verkehrssituationsverteilungen vorbereitet. Die Verteilung «CH Durchschnitt» bildet den Schweizer Durchschnitt ab und wurde ohne Anpassungen aus HBEFA 5.1 übernommen. Die Verteilung «CH Innerorts» basiert auf der gleichnamigen Verteilung in HBEFA 5.1, hat aber eine geringere Gewichtung bei Verkehrssituationen mit höheren Geschwindigkeiten, damit die Durchschnittsgeschwindigkeit besser zur Geschwindigkeit des Einsatzprofils passt. Die gleiche Anpassung wurde für die Verteilung «CH Ausserorts» vorgenommen. Die Verteilung «CH Ausserorts (BERG)» wurde speziell für dieses Projekt konzipiert. Sie basiert ebenfalls auf der Verteilung «CH Ausserorts», enthält jedoch keine Verkehrssituationen mit Längsneigungen von weniger als 4%, um eine Bergstrecke abzubilden (Abbildung 67). Tabelle 18 zeigt auf, welche Verkehrssituationsverteilungen für welche Linientypen verwendet wurden und Tabelle 19 zeigt die Zusammensetzung der verwendeten Verkehrssituationsverteilungen.

Abbildung 67: Anteil der Fahrzyklen nach Längsneigung



Grafik INFRAS

Tabelle 18: Linientyp und Verkehrssituationsverteilung

Linientyp	Abkürzung	Verkehrssituationsverteilung
Orts-/Agglomerationslinie	OV	CH Innerorts
Regionallinie Mittelland	RV-M	CH Ausserorts
Regionallinie Berggebiet	RV-B	CH Ausserorts (Berg)
Bahnersatz	Bahners	CH Durchschnitt

Tabelle 19: Zusammensetzung der Einsatzprofile aus Verkehrssituationen in HBEFA

Verkehrssituation	CH Durchschnitt				CH Innerorts				CH Ausserorts				CH Ausserorts (BERG)			
	0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%	0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%	0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%	0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%
Land/AB/80/fluessig	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/MW/80/Heavy	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/MW/80/Satur.	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/MW/80/St+Go	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/MW/80/St+Go2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/MW/100/Freeflow	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/MW/100/Heavy	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/MW/100/Satur.	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/MW/100/St+Go	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/MW/100/St+Go2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/MW/120/Freeflow	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/MW/120/Heavy	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/MW/120/Satur.	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/MW/120/St+Go	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/MW/120/St+Go2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Trunk/60/Freeflow	0.08%	0.05%	0.02%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.68%	0.46%	0.16%	0.20%	0.00%	0.00%	0.00%	1.45%
RUR/Trunk/60/Heavy	0.06%	0.04%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.48%	0.31%	0.14%	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.55%
RUR/Trunk/60/Satur.	0.05%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.36%	0.15%	0.07%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.11%
RUR/Trunk/60/St+Go	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.01%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Trunk/60/St+Go2	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.01%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Trunk/80/Freeflow	1.56%	0.81%	0.36%	0.48%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Trunk/80/Heavy	1.25%	0.62%	0.20%	0.35%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Trunk/80/Satur.	1.74%	0.43%	0.16%	0.22%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Trunk/80/St+Go	0.03%	0.01%	0.01%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Trunk/80/St+Go2	0.04%	0.02%	0.01%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Trunk/100/Freeflow	1.04%	0.54%	0.21%	0.21%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Trunk/100/Heavy	0.51%	0.25%	0.09%	0.11%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Trunk/100/Satur.	0.21%	0.02%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Trunk/100/St+Go	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Trunk/100/St+Go2	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr/50/Freeflow	2.48%	2.26%	0.99%	0.89%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.05%	2.91%	1.47%	1.64%	0.00%	0.00%	0.00%	12.01%
RUR/Distr/50/Heavy	2.51%	1.92%	0.61%	0.48%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.74%	2.01%	0.88%	0.72%	0.00%	0.00%	0.00%	5.26%
RUR/Distr/50/Satur.	1.11%	0.76%	0.26%	0.16%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.36%	0.88%	0.30%	0.25%	0.00%	0.00%	0.00%	1.81%

Verkehrssituation	CH Durchschnitt				CH Innerorts				CH Ausserorts				CH Ausserorts (BERG)			
	0% +/-2%	+/-4%	+/-6%		0% +/-2%	+/-4%	+/-6%		0% +/-2%	+/-4%	+/-6%		0% +/-2%	+/-4%	+/-6%	
RUR/Distr/50/St+Go	0.07%	0.06%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.09%	0.07%	0.02%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.13%
RUR/Distr/50/St+Go2	0.07%	0.07%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.12%	0.08%	0.04%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.22%
RUR/Distr/60/Freeflow	1.05%	0.79%	0.32%	0.28%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	4.92%	4.01%	1.69%	1.69%	0.00%	0.00%	0.00%	12.34%
RUR/Distr/60/Heavy	1.50%	0.89%	0.28%	0.21%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	6.12%	3.92%	1.37%	1.07%	0.00%	0.00%	0.00%	7.83%
RUR/Distr/60/Satur.	1.08%	0.53%	0.16%	0.11%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	3.86%	2.04%	0.65%	0.51%	0.00%	0.00%	0.00%	3.71%
RUR/Distr/60/St+Go	0.12%	0.06%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.57%	0.21%	0.08%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.34%
RUR/Distr/60/St+Go2	0.13%	0.06%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.71%	0.25%	0.09%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.36%
RUR/Distr/80/Freeflow	3.93%	3.16%	1.44%	1.61%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr/80/Heavy	3.06%	2.08%	0.67%	0.56%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr/80/Satur.	1.32%	0.70%	0.34%	0.19%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr/80/St+Go	0.08%	0.04%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr/80/St+Go2	0.05%	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr/90/Freeflow	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr/90/Heavy	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr/100/Freeflow	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr/100/Heavy	0.09%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr/100/Satur.	0.12%	0.07%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr/100/St+Go	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr/100/St+Go2	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr-sin./50/Freeflow	0.01%	0.01%	0.00%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.01%	0.02%	0.18%	0.00%	0.00%	0.00%	1.29%
RUR/Distr-sin./50/Heavy	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%	0.01%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%
RUR/Distr-sin./50/Satur.	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
RUR/Distr-sin./50/St+Go	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr-sin./50/St+Go2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr-sin./60/Freeflow	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.02%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.39%
RUR/Distr-sin./60/Heavy	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%
RUR/Distr-sin./60/Satur.	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%
RUR/Distr-sin./60/St+Go	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr-sin./80/Freeflow	0.03%	0.03%	0.09%	0.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr-sin./80/Heavy	0.01%	0.00%	0.03%	0.09%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr-sin./80/Satur.	0.01%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr-sin./80/St+Go	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Distr-sin./80/St+Go2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Local/50/Freeflow	0.78%	0.66%	0.34%	0.39%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.31%	1.09%	0.59%	0.73%	0.00%	0.00%	0.00%	5.37%
RUR/Local/50/Heavy	0.74%	0.63%	0.32%	0.37%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.24%	1.03%	0.56%	0.69%	0.00%	0.00%	0.00%	5.06%
RUR/Local/50/Satur.	0.40%	0.34%	0.17%	0.20%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.67%	0.56%	0.30%	0.38%	0.00%	0.00%	0.00%	2.75%
RUR/Local/50/St+Go	0.07%	0.06%	0.03%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.12%	0.10%	0.06%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.50%
RUR/Local/50/St+Go2	0.04%	0.03%	0.02%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%	0.05%	0.03%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.25%

	CH Durchschnitt				CH Innerorts				CH Ausserorts				CH Ausserorts (BERG)			
Verkehrssituation	0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%	0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%	0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%	0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%
RUR/Local/60/Freeflow	0.27%	0.15%	0.06%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.32%	0.97%	0.35%	0.43%	0.00%	0.00%	0.00%	3.15%
RUR/Local/60/Heavy	0.25%	0.14%	0.06%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.25%	0.91%	0.33%	0.41%	0.00%	0.00%	0.00%	2.97%
RUR/Local/60/Satur.	0.14%	0.08%	0.03%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.68%	0.50%	0.18%	0.22%	0.00%	0.00%	0.00%	1.61%
RUR/Local/60/St+Go	0.02%	0.01%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.12%	0.09%	0.03%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.30%
RUR/Local/60/St+Go2	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%	0.05%	0.02%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.15%
RUR/Local/80/Freeflow	0.93%	0.78%	0.36%	0.57%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Local/80/Heavy	0.88%	0.74%	0.34%	0.54%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Local/80/Satur.	0.48%	0.40%	0.19%	0.29%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Local/80/St+Go	0.09%	0.07%	0.03%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Local/80/St+Go2	0.04%	0.04%	0.02%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Local-sin./50/Freeflow	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.31%
RUR/Local-sin./50/Heavy	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.29%
RUR/Local-sin./50/Satur.	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.16%
RUR/Local-sin./50/St+Go	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%
RUR/Local-sin./50/St+Go2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
RUR/Local-sin./60/Freeflow	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.19%
RUR/Local-sin./60/Heavy	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.18%
RUR/Local-sin./60/Satur.	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.10%
RUR/Local-sin./60/St+Go	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%
RUR/Local-sin./60/St+Go2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
RUR/Local-sin./80/Freeflow	0.01%	0.01%	0.01%	0.09%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Local-sin./80/Heavy	0.01%	0.01%	0.01%	0.09%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Local-sin./80/Satur.	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Local-sin./80/St+Go	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Local-sin./80/St+Go2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
RUR/Access/30/Freeflow	0.32%	0.27%	0.14%	0.21%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%	0.04%	0.01%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%
RUR/Access/30/Heavy	0.35%	0.30%	0.15%	0.23%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.07%	0.05%	0.02%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.22%
RUR/Access/30/Satur.	0.35%	0.30%	0.15%	0.23%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.07%	0.05%	0.02%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.22%
RUR/Access/50/Freeflow	0.14%	0.09%	0.04%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.30%	0.23%	0.11%	0.28%	0.00%	0.00%	0.00%	2.02%
RUR/Access/50/Heavy	0.15%	0.10%	0.04%	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.33%	0.25%	0.12%	0.30%	0.00%	0.00%	0.00%	2.22%
RUR/Access/50/Satur.	0.15%	0.10%	0.04%	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.33%	0.25%	0.12%	0.30%	0.00%	0.00%	0.00%	2.22%
URB/MW-Nat./120/Freeflow	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/MW-Nat./120/Heavy	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/MW-Nat./120/Satur.	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/MW-Nat./120/St+Go	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/MW-Nat./120/St+Go2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/MW-City/80/Freeflow	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/MW-City/80/Heavy	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

	CH Durchschnitt				CH Innerorts				CH Ausserorts				CH Ausserorts (BERG)			
Verkehrssituation	0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%	0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%	0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%	0%	+/-2%	+/-4%	+/-6%
URB/MW-City/80/Satur.	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/MW-City/80/St+Go	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/MW-City/80/St+Go2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/MW-City/100/Freeflow	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/MW-City/100/Heavy	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/MW-City/100/Satur.	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/MW-City/100/St+Go	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/MW-City/100/St+Go2	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Trunk-Nat./80/Freeflow	0.59%	0.35%	0.08%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Trunk-Nat./80/Heavy	0.42%	0.27%	0.06%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Trunk-Nat./80/Satur.	0.41%	0.31%	0.07%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Trunk-Nat./80/St+Go	0.02%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Trunk-Nat./80/St+Go2	0.02%	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Trunk-Nat./100/Freeflow	0.06%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Trunk-Nat./100/Heavy	0.09%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Trunk-Nat./100/Satur.	0.03%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Trunk-Nat./100/St+Go	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Trunk-Nat./100/St+Go2	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Distr/30/Freeflow	0.26%	0.14%	0.05%	0.04%	1.50%	0.83%	0.28%	0.26%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Distr/30/Heavy	0.47%	0.24%	0.08%	0.07%	2.69%	1.40%	0.48%	0.41%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Distr/30/Satur.	0.32%	0.14%	0.05%	0.05%	1.88%	0.82%	0.30%	0.30%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Distr/30/St+Go	0.03%	0.01%	0.00%	0.01%	0.18%	0.06%	0.02%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Distr/30/St+Go2	0.04%	0.01%	0.01%	0.01%	0.22%	0.07%	0.03%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Distr/50/Freeflow	0.87%	0.53%	0.19%	0.16%	4.73%	2.86%	1.03%	0.83%	0.49%	0.31%	0.13%	0.19%	0.00%	0.00%	0.00%	1.40%
URB/Distr/50/Heavy	1.47%	0.87%	0.31%	0.20%	7.97%	4.71%	1.70%	1.02%	0.86%	0.54%	0.19%	0.19%	0.00%	0.00%	0.00%	1.39%
URB/Distr/50/Satur.	1.12%	0.54%	0.22%	0.15%	6.05%	2.94%	1.22%	0.85%	0.71%	0.34%	0.09%	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.59%
URB/Distr/50/St+Go	0.10%	0.04%	0.02%	0.02%	0.55%	0.22%	0.09%	0.10%	0.10%	0.03%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%
URB/Distr/50/St+Go2	0.13%	0.04%	0.02%	0.04%	0.70%	0.21%	0.09%	0.20%	0.11%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%
URB/Distr/60/Freeflow	0.43%	0.23%	0.07%	0.07%	1.47%	0.83%	0.20%	0.16%	1.59%	0.84%	0.37%	0.39%	0.00%	0.00%	0.00%	2.82%
URB/Distr/60/Heavy	0.84%	0.45%	0.14%	0.13%	3.27%	1.71%	0.49%	0.38%	2.55%	1.38%	0.54%	0.59%	0.00%	0.00%	0.00%	4.30%
URB/Distr/60/Satur.	0.70%	0.37%	0.11%	0.10%	2.98%	1.46%	0.39%	0.33%	1.67%	1.11%	0.36%	0.35%	0.00%	0.00%	0.00%	2.55%
URB/Distr/60/St+Go	0.09%	0.04%	0.01%	0.01%	0.38%	0.15%	0.05%	0.06%	0.22%	0.16%	0.02%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.33%
URB/Distr/60/St+Go2	0.14%	0.07%	0.02%	0.05%	0.56%	0.24%	0.08%	0.25%	0.38%	0.26%	0.05%	0.09%	0.00%	0.00%	0.00%	0.65%
URB/Distr/80/Freeflow	0.63%	0.38%	0.13%	0.26%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Distr/80/Heavy	0.69%	0.40%	0.11%	0.14%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Distr/80/Satur.	0.36%	0.23%	0.07%	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Distr/80/St+Go	0.05%	0.03%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Distr/80/St+Go2	0.05%	0.03%	0.00%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

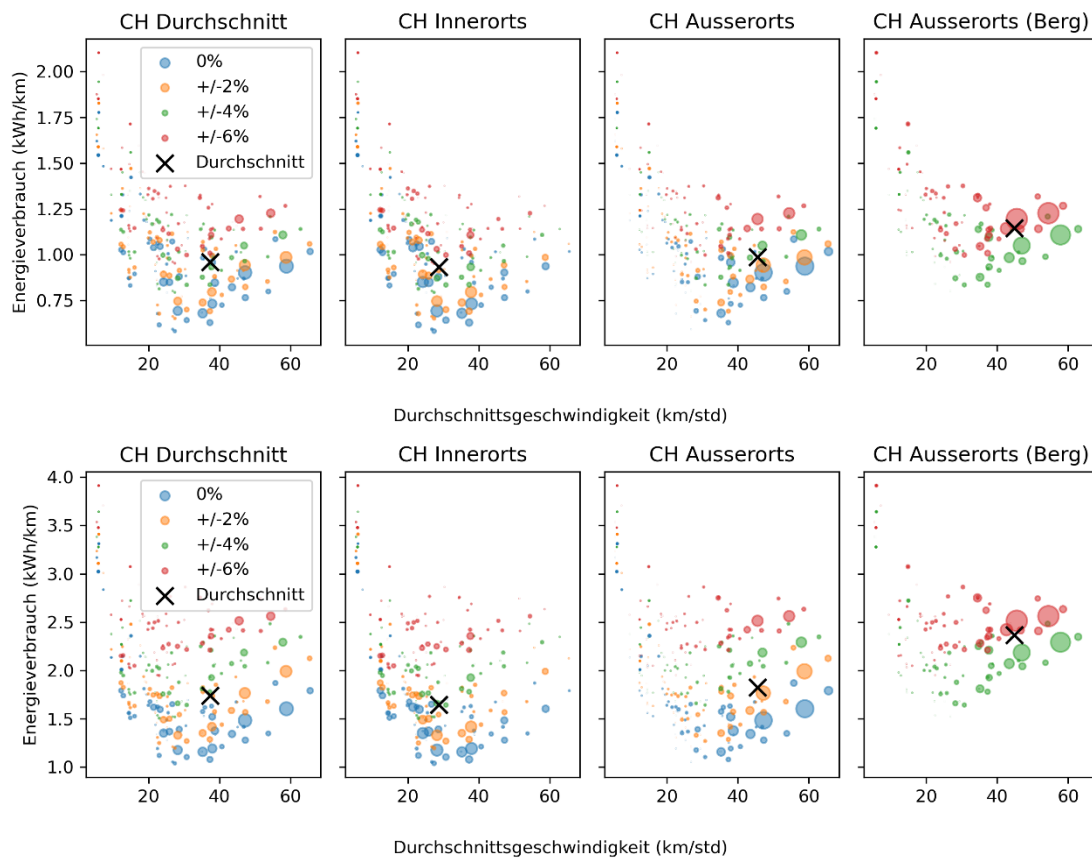
	CH Durchschnitt				CH Innerorts				CH Ausserorts				CH Ausserorts (BERG)			
Verkehrssituation	0% +/-2%	+/-4%	+/-6%		0% +/-2%	+/-4%	+/-6%		0% +/-2%	+/-4%	+/-6%		0% +/-2%	+/-4%	+/-6%	
URB/Local/30/Freeflow	0.07%	0.05%	0.02%	0.02%	0.42%	0.27%	0.12%	0.12%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%
URB/Local/30/Heavy	0.11%	0.07%	0.03%	0.03%	0.62%	0.39%	0.18%	0.18%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%
URB/Local/30/Satur.	0.15%	0.09%	0.04%	0.04%	0.85%	0.54%	0.25%	0.25%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%
URB/Local/30/St+Go	0.05%	0.03%	0.01%	0.02%	0.29%	0.18%	0.08%	0.09%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
URB/Local/30/St+Go2	0.03%	0.02%	0.01%	0.01%	0.14%	0.09%	0.04%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%
URB/Local/50/Freeflow	0.20%	0.14%	0.06%	0.07%	1.09%	0.73%	0.30%	0.37%	0.11%	0.09%	0.04%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.54%
URB/Local/50/Heavy	0.30%	0.20%	0.08%	0.11%	1.61%	1.08%	0.45%	0.55%	0.17%	0.13%	0.06%	0.11%	0.00%	0.00%	0.00%	0.80%
URB/Local/50/Satur.	0.41%	0.27%	0.12%	0.15%	2.21%	1.47%	0.62%	0.75%	0.23%	0.18%	0.08%	0.15%	0.00%	0.00%	0.00%	1.09%
URB/Local/50/St+Go	0.14%	0.09%	0.04%	0.05%	0.76%	0.50%	0.21%	0.26%	0.08%	0.06%	0.03%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.37%
URB/Local/50/St+Go2	0.07%	0.05%	0.02%	0.02%	0.38%	0.25%	0.11%	0.13%	0.04%	0.03%	0.01%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.19%
URB/Local/60/Freeflow	0.06%	0.03%	0.01%	0.01%	0.20%	0.11%	0.04%	0.02%	0.19%	0.09%	0.04%	0.08%	0.00%	0.00%	0.00%	0.58%
URB/Local/60/Heavy	0.08%	0.04%	0.02%	0.02%	0.29%	0.16%	0.06%	0.03%	0.28%	0.14%	0.06%	0.12%	0.00%	0.00%	0.00%	0.86%
URB/Local/60/Satur.	0.11%	0.06%	0.02%	0.02%	0.40%	0.22%	0.09%	0.04%	0.39%	0.19%	0.08%	0.16%	0.00%	0.00%	0.00%	1.18%
URB/Local/60/St+Go	0.04%	0.02%	0.01%	0.01%	0.14%	0.08%	0.03%	0.01%	0.13%	0.07%	0.03%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.40%
URB/Local/60/St+Go2	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.07%	0.04%	0.01%	0.01%	0.07%	0.03%	0.01%	0.03%	0.00%	0.00%	0.00%	0.20%
URB/Access/30/Freeflow	0.27%	0.16%	0.06%	0.07%	1.54%	0.94%	0.33%	0.40%	0.02%	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%
URB/Access/30/Heavy	0.30%	0.18%	0.06%	0.08%	1.70%	1.04%	0.37%	0.44%	0.02%	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.07%
URB/Access/30/Satur.	0.30%	0.18%	0.06%	0.08%	1.70%	1.04%	0.37%	0.44%	0.02%	0.01%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.07%
URB/Access/50/Freeflow	0.11%	0.05%	0.02%	0.02%	0.58%	0.26%	0.11%	0.09%	0.13%	0.06%	0.02%	0.04%	0.00%	0.00%	0.00%	0.30%
URB/Access/50/Heavy	0.13%	0.06%	0.02%	0.02%	0.64%	0.28%	0.12%	0.10%	0.14%	0.07%	0.02%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.33%
URB/Access/50/Satur.	0.13%	0.06%	0.02%	0.02%	0.64%	0.28%	0.12%	0.10%	0.14%	0.07%	0.02%	0.05%	0.00%	0.00%	0.00%	0.33%
URB/Trunk-City/90/Freeflow	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Trunk-City/90/Heavy	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
URB/Trunk-City/90/Satur.	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

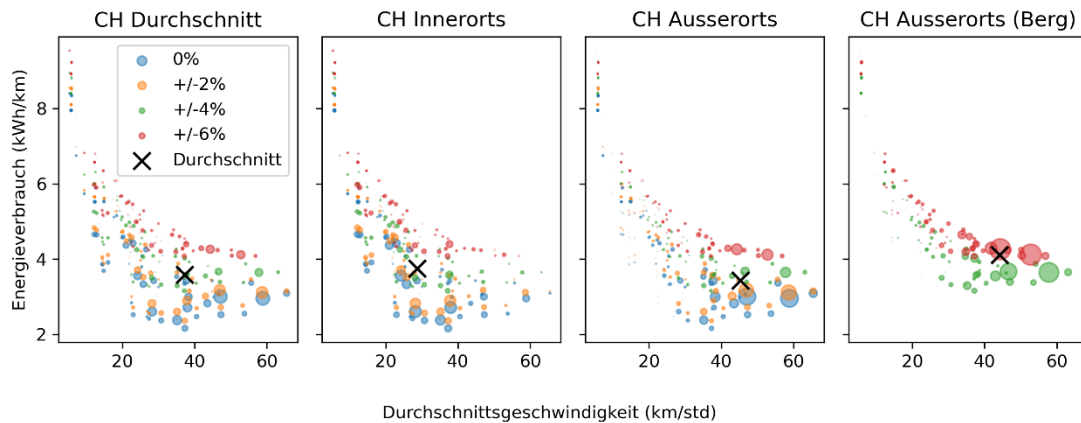
Tabelle INFRAS

Energieverbrauchswerte aus PHEM

Abbildung 68 zeigt die resultierenden Energieverbrauchswerte aus PHEM für die vier Verkehrssituationsverteilungen. Mit steigender Durchschnittsgeschwindigkeit sinkt der durchschnittliche Energieverbrauch bis zu einem Optimum von ca. 30–50 km/h (je nach Antrieb und Verteilung). Danach steigt der Energieverbrauch mit zunehmender Geschwindigkeit. Grund dafür ist die Dominanz der Beschleunigungsenergie und der Nebenverbraucher bei niedrigeren Geschwindigkeiten sowie der Luftwiderstand bei höheren Geschwindigkeiten. Der Energieverbrauch hängt zudem stark von der Längsneigung ab.

Abbildung 68: Energieverbrauch nach Durchschnittsgeschwindigkeit und Längsneigung





Die Grafiken zeigen den Energieverbrauch und die Durchschnittsgeschwindigkeiten für alle Fahrzyklen, die im PHEM modelliert wurden. Die Kreise zeigen die im PHEM modellierte Ergebnisse für einzelne Fahrzyklen; die Kreuze illustrieren die gewichteten Durchschnittswerte für die aggregierte Fahrzyklen, welche für die Einsatzprofile verwendet wurden. Die Kreisfarben zeigen die Längsneigung auf und die Grösse der Kreise zeigt den Anteil der Fahrzyklen im Durchschnitt auf. Die vier Grafiken oben gelten für 12m-Depotlader, die mittleren für 12m-Brennstoffzellenbusse und die unteren vier Grafiken für 12m-Wasserstoffverbrennungsbusse.

Grafik INFRAS

A5. Anpassung des Heizenergiebedarfs von Batteriebussen

Die Modellierung des PHEM berücksichtigt neben dem Leistungsbedarf der Fahrzeuge für den Vortrieb auch den Bedarf für Nebenaggregate. Bei Batteriebussen wird für die Nebenaggregate bei Standardbussen von 4.9 kW, bei Gelenkbussen von 6.3 kW ausgegangen. Diese Werte beinhalten neben dem Leistungsbedarf für die Druckluft, die Lenkungsunterstützung, die Beleuchtung etc. auch den Leistungsbedarf für die Heizung und Klimatisierung der Fahrzeuge (HKL). Dieser macht ca. 45% des Bedarfs aller Nebenaggregate aus und wird im PHEM unabhängig von der effektiven Aussentemperatur als konstant angenommen. Als Basis für die Berechnung des Bedarfs wird die Jahresmitteltemperatur angenommen. So resultiert ein sehr geringer Leistungsbedarf für die Heizung und Klimatisierung, weil von einem Betrieb bei 8-12 °C ausgegangen wird. Bei einer Innentemperatur von 18-20 °C beträgt die Temperaturdifferenz etwa 10 °C. Im Winter ist sie aber durchschnittlich doppelt so hoch und an einem kalten Wintertag kann die Temperaturdifferenz auch gut dreimal so hoch werden. Somit ist klar, dass PHEM – und damit auch HBEFA – den Leistungs- und damit auch den Energiebedarf zum Heizen von Batteriebussen unterschätzt. Bei den anderen Antriebstypen wird der Bedarf zwar auch unterschätzt, da dort zum Heizen Abwärme genutzt wird, spielt es für den Energiebedarf der Fahrzeuge keine Rolle.

Für dieses Projekt haben wir den Energiebedarf von Batteriebussen angepasst, um realistischere Daten zum Heizenergiebedarf zu verwenden und um die Ladeverluste zu berücksichtigen. Dazu sind wir folgendermassen vorgegangen:

1. Nebenaggregate aus den HBEFA Ergebnissen herausgerechnet (Leistung der Nebenaggregate / Durchschnittsgeschwindigkeit im Einsatzprofil) → spezifischer Energiebedarf des Antriebs
2. Spezifischer Energiebedarf der Nebenaggregate ohne Heizen / Klimatisierung berechnet (Leistung der Nebenaggregate * (1-Anteil HKL an Nebenaggregaten) / Durchschnittsgeschwindigkeit im Einsatzprofil)
3. Durchschnittlicher spezifischer Heizenergieverbrauch für Standardbusse berechnet, aus dem Verbrauch der RBS-Busse für die Dieselheizung in 2024 (rund 3.5 l/100 km) unter Berücksichtigung, dass eine Wärmepumpenheizung nur halb so viel Energie braucht wie eine Dieselheizung
4. Wert für Gelenkbusse skaliert (Heizenergiebedarf Standardbusse * Leistungsbedarf für Nebenaggregate bei Gelenkbus / Leistungsbedarf für Nebenaggregate bei Standardbussen)
5. «Durchschnittlicher spezifischer Energiebedarf ab Ladegerät» berechnet, aus spez. Energiebedarf Antrieb + spez. Energiebedarf Nebenaggregate ohne Heizen/Klima + spez. Energiebedarf Heizen unter Berücksichtigung der Effizienz des Ladegerätes (90%)³¹
6. Spezifischer Energiebedarf an kalten Wintertagen berechnet, aus spez. Energiebedarf Antrieb + spez. Energiebedarf Nebenaggregate ohne Heizen/Klima + (spez. Energiebedarf Heizen * 3)

Tabelle 20, Tabelle 21, Tabelle 22, Tabelle 23 und Tabelle 24 zeigen die unkorrigierte Resultate der Modellierung in PHEM. Die finalen Ergebnisse sind in Tabelle 5 bis Tabelle 9 ausgewiesen

Tabelle 20: Energieverbrauch und Emissionen in OV_SB_HVZ-V gemäss HBEFA

Grösse	Standardbus (12 m)	Standardbus (12 m)	Standardbus (12 m)	Standardbus (12 m)
Antrieb	Wasserstoffverbrennungsbuss	Diesel-Hybridbus (Euro VII)	Brennstoffzellenbus (H2)	Batterieelektrischer Bus
subsegment HBEFA	UBus Std >15-18t H2 ICE	UBus Std >15-18t HEV Euro-7	UBus Std >15-18t FCEV	UBus Std >15-18t BEV
Energy consumption (kWh/km)	4.124482992	2.558100264	1.675132225	0.971774346
PM10 non-exhaust (g/km)	0.501346182	0.296371735	0.152191367	0.152191367
NOX (g/km)	0.004290191	0.004290191	0	0
CO (g/km)	0.015674911	0.238354909	0	0
HC (g/km)	0.000190428	0.002535081	0	0
PM2.5 (g/km)	0.001789736	0.004980931	0	0
N2O (g/km)	0	0.103805294	0	0
NH3 (g/km)	0	0.004348636	0	0
SO2 (g/km)	0	0.017986245	0	0
CH4 (g/km)	0	0.00106022	0	0
CO2 (g/km)	0	647.307954	0	0

Tabelle: EcoExistence

³¹ Gemäss HBEFA 5.1 für hohe Ladeleistung

Tabelle 21: Energieverbrauch und Emissionen in OV_GB_Int gemäss HBEFA

Grösse	Gelenkbus (18 m)	Gelenkbus (18 m)	Gelenkbus (18 m)	Gelenkbus (18 m)
Antrieb	Wasserstoffverbrennungsbus	Diesel-Hybridbus (Euro VII)	Brennstoffzellenbus (H2)	Batterieelektrischer Bus
subsegment HBEFA	UBus Artic >18t H2 ICE	UBus Artic >18t HEV Euro-7	UBus Artic >18t FCEV	UBus Artic >18t BEV
Energy consumption (kWh/km)	5.555179312	3.206639416	2.299150727	1.347587839
PM10 non-exhaust (g/km)	0.781386904	0.265216071	0.220308658	0.220308658
NOX (g/km)	0.006148276	0.006148276	0	0
CO (g/km)	0.023129003	0.280618805	0	0
HC (g/km)	0.000171346	0.00318872	0	0
PM2.5 (g/km)	0.002763573	0.006853788	0	0
N2O (g/km)	0	0.134411404	0	0
NH3 (g/km)	0	0.006982266	0	0
SO2 (g/km)	0	0.025366198	0	0
CH4 (g/km)	0	0.001324185	0	0
CO2 (g/km)	0	811.415889	0	0

Tabelle: EcoExistence

Tabelle 22: Energieverbrauch und Emissionen in RV-M_GB_Int gemäss HBEFA

Grösse	Gelenkbus (18 m)	Gelenkbus (18 m)	Gelenkbus (18 m)	Gelenkbus (18 m)
Antrieb	Wasserstoffverbrennungsbus	Diesel-Hybridbus (Euro VII)	Brennstoffzellenbus (H2)	Batterieelektrischer Bus
subsegment HBEFA	UBus Artic >18t H2 ICE	UBus Artic >18t HEV Euro-7	UBus Artic >18t FCEV	UBus Artic >18t BEV
Energy consumption (kWh/km)	4.763551974	2.847460552	2.216047104	1.247006613
PM10 non-exhaust (g/km)	0.58701274	0.304069778	0.191721999	0.191721999
NOX (g/km)	0.006242264	0.006242264	0	0
CO (g/km)	0.022354206	0.192462122	0	0
HC (g/km)	0.000104083	0.002383603	0	0
PM2.5 (g/km)	0.002748472	0.005970889	0	0
N2O (g/km)	0	0.101307632	0	0
NH3 (g/km)	0	0.006157966	0	0
SO2 (g/km)	0	0.022538209	0	0
CH4 (g/km)	0	0.000900792	0	0
CO2 (g/km)	0	720.5283898	0	0

Tabelle: EcoExistence

Tabelle 23: Energieverbrauch und Emissionen in RV_B_SB_Int gemäss HBEFA

Grösse	Standardbus (12 m)	Standardbus (12 m)	Standardbus (12 m)	Standardbus (12 m)
Antrieb	Wasserstoffverbrennungsbus	Diesel-Hybridbus (Euro VII)	Brennstoffzellenbus (H2)	Batterieelektrischer Bus
subsegment HBEFA	UBus Std >15-18t H2 ICE	UBus Std >15-18t HEV Euro-7	UBus Std >15-18t FCEV	UBus Std >15-18t BEV
Energy consumption (kWh/km)	4.675575382	2.250207261	2.372606665	1.146350295
PM10 non-exhaust (g/km)	0.588811186	0.345113051	0.197885496	0.197885496
NOX (g/km)	0.008064743	0.008064743	0	0
CO (g/km)	0.022852575	0.163789953	0	0
HC (g/km)	4.09825E-05	0.001764484	0	0
PM2.5 (g/km)	0.002979045	0.005519652	0	0
N2O (g/km)	0	0.084469071	0	0
NH3 (g/km)	0	0.006503552	0	0
SO2 (g/km)	0	0.022191482	0	0
CH4 (g/km)	0	0.000606933	0	0
CO2 (g/km)	0	569.3979548	0	0

Tabelle: EcoExistence

Tabelle 24: Energieverbrauch und Emissionen in Bahners_GB_Int gemäss HBEFA

Grösse	Gelenkbus (18 m)	Gelenkbus (18 m)	Gelenkbus (18 m)	Gelenkbus (18 m)
Antrieb	Wasserstoffverbrennungsbus	Diesel-Hybridbus (Euro VII)	Brennstoffzellenbus (H2)	Batterieelektrischer Bus
subsegment HBEFA	UBus Artic >18t H2 ICE	UBus Artic >18t HEV Euro-7	UBus Artic >18t FCEV	UBus Artic >18t BEV
Energy consumption (kWh/km)	4.858897071	2.931778975	2.338826215	1.321644246
PM10 non-exhaust (g/km)	0.569794922	0.282105716	0.205861829	0.205861829
NOX (g/km)	0.007095783	0.007095783	0	0
CO (g/km)	0.025515678	0.17139914	0	0
HC (g/km)	7.33183E-05	0.002540151	0	0
PM2.5 (g/km)	0.003138944	0.006098396	0	0
N2O (g/km)	0	0.100607259	0	0
NH3 (g/km)	0	0.008728641	0	0
SO2 (g/km)	0	0.024027553	0	0
CH4 (g/km)	0	0.00107094	0	0
CO2 (g/km)	0	741.8645299	0	0

Tabelle: EcoExistence

A6. Energieverbrauch im Vergleich

Tabelle 25 vergleicht die Energieverbrauchszahlen aus der vorliegenden Studie mit denen der CSEM (BAV 2022b), der HEIA-FR (BAV 2022a) und des Umweltrechner Verkehr (BFE 2025). Wie im Anhang A4 diskutiert (vgl. Abbildung 68), hängt der Energieverbrauch stark vom gefahrenen Zyklus ab. Ein direkter Vergleich zwischen Fahrlinien oder Studien ist deshalb etwas problematisch. Gut verglichen werden können jedoch die relativen Energieverbräuche der Antriebstypen für die gleichen Fahrzyklen (Reiter «Energieverbrauch ggü. BEB» in Tabelle 25).

Tabelle 25: Energieverbrauchsvergleich mit anderen Studien

Typ (Linie)	km/h	Energieverbrauch (kWh/km)				Energieverbrauch ggü. BEB			
		Diesel ¹	H2-ICE	FCEB	BEB	Diesel ¹	H2-ICE	FCEB	BEB
Standardbus									
Die vorliegende Studie									
Orts-/Agglo (OV_SB_HVZ-V)	22.2	2.56	4.12	1.68	1.25	2.05	3.30	1.34	1.00
Berg (RV-B_SB_Int)	32.1	2.25	4.68	2.37	1.47	1.53	3.18	1.61	1.00
CSEM (BAV 2022b)									
Urbain (5)	21.8	3.98	3.65	2.96	1.60	2.49	2.29	1.86	1.00
Urbain (201)	24.7	3.76	3.45	2.77	1.48	2.54	2.33	1.87	1.00
Rural (234)	39.3	2.82	2.63	2.35	1.19	2.37	2.20	1.97	1.00
Rural (260)	39.7	2.74	2.54	2.45	1.33	2.06	1.92	1.85	1.00
Umweltrechner Verkehr (BFE 2025)									
Default	-	3.47	-	2.83	1.70	2.04	-	1.66	1.00
Gelenkbus									
Die vorliegende Studie									
Orts-/Agglo (OV_GB_Int)	22.2	3.21	5.56	2.30	1.71	1.87	3.24	1.34	1.00
Regional (RV-M_GB_Int)	32.1	2.85	4.76	2.22	1.54	1.85	3.10	1.44	1.00
Bahnersatz (Bahners_GB)	50.0	2.93	4.86	2.34	1.54	1.90	3.15	1.52	1.00
HEIA-FR (BAV 2022a)									
Urban	-	5.66	7.80	3.90*	2.50*	2.27	3.12	1.56	1.00
Regional	-	4.29	4.84 - 5.10	3.90*	3.40*	1.26	1.42 - 1.50	1.15	1.00
Umweltrechner Verkehr (BFE 2025)									
Default	-	4.49	-	3.71	2.26	1.99	-	1.64	1.00

¹ In der vorliegenden Studie und im Umweltrechner Verkehr wird ein hybridisierter Dieselantrieb angenommen. In den Studien von HEIA-FR und CSEM werden konventionelle (nicht hybridisierte) Dieselbusse betrachtet.

* Diese Werte basieren z.T. auf Herstellerangaben und stellen Spitzenverbräuche dar.

Tabelle INFRAS.

In der vorliegenden Studie und im Umweltrechner Verkehr schneiden Dieselbusse in Vergleich zu Batteriebusse deutlich effizienter ab als in den Studien von CSEM und HEIA-FR, mit Ausnahme der regionalen Linie in der HEIA-FR-Studie. Dies liegt vermutlich daran, dass in der PHEM-Modellierung und im Umweltrechner Verkehr von Diesel-Hybridbussen ausgegangen wird, während in den Studien von CSEM und HEIA-FR konventionelle Dieselantriebe ohne Hybridisierung betrachtet werden. Die PHEM-Modellierungen, die HEIA-FR-Studie und der Umweltrechner Verkehr schätzen den Energieverbrauch von Brennstoffzellenbussen näher an dem von batterieelektrischen Bussen ein als die CSEM-Studie.

Ein detaillierterer Vergleich der Fahrzyklen und Verbrauchsannahmen wäre erforderlich, um weitere Unterschiede in den Ergebnissen zu erklären. HEIA-FR und CSEM basieren auf realen Betriebsdaten von Diesel-Gelenkbussen auf vier Linien der Freiburgischen Verkehrsbetriebe (TPF). In der CSEM-Studie dienen diese Daten zur Kalibrierung eines physikalischen Modells, das die Verbrauchswerte für Standardbusse liefert. In der HEIA-FR-Studie hingegen werden die Verbrauchswerte für FCEB- und BEB-Fahrzeuge auf Basis historischer Daten aus europäischen Projekten bzw. Herstellerangaben extrapoliert und gemäss den Erfahrungen der TPF hochskaliert. Die resultierenden Werte stellen Spitzenverbräuche dar. Im Gegensatz dazu modellieren die vorliegende Studie und der Umweltrechner Verkehr die Verbrauchswerte für alle Antriebsarten unter Berücksichtigung repräsentativer Verkehrssituationen und Längsneigungen, die zu schweizweiten Einsatzprofilen aggregiert werden (siehe Anhang A4). Während der Umweltrechner Verkehr das Herstellungsjahr 2020 berücksichtigt, bezieht sich die vorliegende Studie auf das Jahr 2030.

Bei Wasserstoff-Verbrennungsbussen sind die aus der PHEM-Modellierung abgeleiteten Energieverbräuche mit denen der regionalen Linie aus der HEIA-FR-Studie vergleichbar, liegen jedoch unter den Werten der urbanen Linie. Mögliche Gründe für diesen Unterschied sind konservativere Annahmen der HEIA-FR zur Spitzeneffizienz (40%) sowie die Verwendung eines prädiktiven Motorkennfelds, das auf einem CNG-Motor basiert. Im Gegensatz dazu fallen die Energieverbräuche in der CSEM-Studie eher optimistisch aus. Anstelle einer Modellierung basierend auf einem Wirkungsgradkennfeld verwendet CSEM konstante Wirkungsgrade von 42% (urban) bzw. 50% (regional) für den H₂-Verbrennungsmotor. Diese Werte liegen etwa 10% über dem angenommenen Wirkungsgrad eines Dieselmotors und erscheinen aus unserer Recherche heraus als zu optimistisch.

Zusammengefasst: Die vorliegende Studie ist, was die mögliche Effizienz von Wasserstoffverbrennungsbussen betrifft, etwas pessimistischer als die CSEM-Studie und etwas optimistischer, was Diesel-Hybridbusse und Brennstoffzellenbusse betrifft. Bei batterieelektrischen Bussen sind die Zahlen in der vorliegenden Studie ebenfalls optimistischer. Dies liegt einerseits an der Wahl der Fahrzyklen und andererseits daran, dass Busse mit einem Herstellungsjahr ab 2030 modelliert wurden. Trotz der Unsicherheiten bei den modellierten Energieverbräuchen sind die Ergebnisse robust: Sensitivitätsanalysen zeigen, dass die Beschlüsse unverändert bleiben, selbst wenn die Annahmen zum Energieverbrauch um 20 bis 30 Prozent variieren (siehe Abbildung 63).

A7. LCIA-Ergebnisse (Tabellen)

OV_SB_HVZ-V Strommix		Impact indicator	Climate change (IPCC2021) GWP 100 kg CO2 eq	Cumulative Energy demand total MJ	Cumulative Energy demand non-renewable MJ	Cumulative Energy demand renewable MJ	UBP total UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	26'390	389'233	353'066	36'166	52'116'190
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	4'266	79'760	77'489	2'271	9'719'147
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	119'823	12'206'648	3'324'513	8'879'737	325'203'981
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	471	0	0	0	104'268'275
Total	Total	pro Jahr	150'951	12'675'641	3'755'068	8'918'175	491'307'594
Diesel-Hybridbus (Euro 7)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	26'835	398'870	361'484	37'386	54'791'554
	Batterien	pro Jahr	286	4'748	4'219	529	910'799
	Ersatzbatterien	pro Jahr	286	4'748	4'219	529	910'799
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	81'479	4'689'267	4'669'980	19'286	162'922'627
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	271'583	0	0	0	361'817'663
Total	Total	pro Jahr	380'470	5'097'633	5'039'902	57'730	581'353'442
Brennstoffzellenbus (H2)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	25'635	385'278	348'412	36'866	52'346'411
	Batterien	pro Jahr	2'863	47'479	42'188	5'291	9'107'992
	Ersatzbatterien	pro Jahr	2'863	47'479	42'188	5'291	9'107'992
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	1'244	22'805	21'542	1'263	3'151'797
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	1'183	21'688	20'487	1'201	2'997'392
	Wasserstofftanks	pro Jahr	2'133	39'880	38'745	1'135	4'859'574
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	48'665	4'957'652	1'350'229	3'606'448	132'079'504
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	45'740'247
Total	Total	pro Jahr	84'586	5'522'261	1'863'791	3'657'496	259'390'909
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	25'635	385'278	348'412	36'866	52'346'411
	Batterien	pro Jahr	18'609	308'615	274'220	34'394	59'201'948
	Ersatzbatterien	pro Jahr	1'450	24'048	21'368	2'680	4'613'179
	Ladestationen	pro Jahr	1'710	27'047	23'732	3'315	5'047'550
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	18'066	1'905'810	511'998	1'393'436	48'435'140
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	45'740'247
Total	Total	pro Jahr	65'470	2'650'799	1'179'731	1'470'691	215'384'476
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	25'635	385'278	348'412	36'866	52'346'411
	Batterien	pro Jahr	18'609	308'615	274'220	34'394	59'201'948
	Ersatzbatterien	pro Jahr	5'568	92'334	82'043	10'290	17'712'514
	Ladestationen	pro Jahr	1'710	27'047	23'732	3'315	5'047'550
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	18'066	1'905'810	511'998	1'393'436	48'435'140
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	45'740'247
Total	Total	pro Jahr	69'588	2'719'084	1'240'407	1'478'301	228'483'810

OV_GB_Int Strommix			Climate change (IPCC2021) GWP 100 kg CO2 eq	Cumulative Energy demand total MJ	Cumulative Energy demand non- renewable MJ	Cumulative Energy demand renewable MJ	UBP total UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	57'648	850'251	771'248	79'003	113'844'089
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	7'584	141'796	137'759	4'037	17'278'484
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	282'427	28'771'536	7'836'003	20'929'880	766'518'193
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	1'274	0	0	0	213'994'222
Total	Total	pro Jahr	348'934	29'763'583	8'745'010	21'012'920	1'111'634'989
Diesel-Hybridbus (Euro 7)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	58'485	869'297	787'818	81'479	119'412'577
	Batterien	pro Jahr	382	6'331	5'625	706	1'214'399
	Ersatzbatterien	pro Jahr	382	6'331	5'625	706	1'214'399
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	178'738	10'286'687	10'244'380	42'307	357'397'916
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	596'863	0	0	0	750'805'743
Total	Total	pro Jahr	834'849	11'168'645	11'043'448	125'197	1'230'045'034
Brennstoffzellenbus (H2)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	56'263	845'592	764'680	80'912	114'887'655
	Batterien	pro Jahr	3'817	63'306	56'250	7'055	12'143'989
	Ersatzbatterien	pro Jahr	3'817	63'306	56'250	7'055	12'143'989
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	1'990	36'488	34'468	2'020	5'042'876
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	1'893	34'700	32'779	1'921	4'795'827
	Wasserstofftanks	pro Jahr	3'792	70'898	68'879	2'019	8'639'242
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	116'890	11'907'824	3'243'127	8'662'357	317'242'840
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	87'674'570
Total	Total	pro Jahr	188'462	13'022'114	4'256'435	8'763'340	562'570'987
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	56'263	845'592	764'680	80'912	114'887'655
	Batterien	pro Jahr	30'538	506'445	450'003	56'442	97'151'915
	Ersatzbatterien	pro Jahr	18'129	300'655	267'148	33'507	57'675'029
	Ladestationen	pro Jahr	2'280	36'063	31'643	4'420	6'730'067
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	43'411	4'579'472	1'230'280	3'348'287	116'384'815
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	87'674'570
Total	Total	pro Jahr	150'621	6'268'227	2'743'754	3'523'568	480'504'049
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	63'296	951'291	860'266	91'026	129'248'612
	Batterien	pro Jahr	34'355	569'750	506'253	63'497	109'295'904
	Ersatzbatterien	pro Jahr	36'746	609'395	541'480	67'915	116'901'042
	Ladestationen	pro Jahr	2'565	40'571	35'598	4'973	7'571'325
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	43'681	4'608'048	1'237'957	3'369'180	117'111'056
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	88'221'659
Total	Total	pro Jahr	180'643	6'779'056	3'181'554	3'596'591	568'349'598

RV-M_GB_Int Strommix			Climate change (IPCC2021) GWP 100 kg CO2 eq	Cumulative Energy demand total MJ	Cumulative Energy demand non-renewable MJ	Cumulative Energy demand renewable MJ	UBP total
		Impact indicator					UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	28'824	425'125	385'624	39'501	56'922'045
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	3'792	70'898	68'879	2'019	8'639'242
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	155'688	15'860'261	4'319'584	11'537'562	422'541'887
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	815	0	0	0	123'572'162
Total	Total	pro Jahr	189'118	16'356'285	4'774'087	11'579'082	611'675'335
Diesel-Hybridbus (Euro 7)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	29'242	434'648	393'909	40'739	59'706'288
	Batterien	pro Jahr	191	3'165	2'813	353	607'199
	Ersatzbatterien	pro Jahr	191	3'165	2'813	353	607'199
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	102'033	5'872'156	5'848'005	24'151	204'020'627
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	338'464	0	0	0	440'369'517
Total	Total	pro Jahr	470'121	6'313'135	6'247'539	65'596	705'310'832
Brennstoffzellenbus (H2)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	28'132	422'796	382'340	40'456	57'443'827
	Batterien	pro Jahr	1'909	31'653	28'125	3'528	6'071'995
	Ersatzbatterien	pro Jahr	1'909	31'653	28'125	3'528	6'071'995
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	995	18'244	17'234	1'010	2'521'438
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	946	17'350	16'390	961	2'397'913
	Wasserstofftanks	pro Jahr	1'896	35'449	34'440	1'009	4'319'621
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	72'427	7'378'336	2'009'509	5'367'377	196'570'276
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	54'303'984
Total	Total	pro Jahr	108'214	7'935'481	2'516'163	5'417'868	329'701'048
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	28'132	422'796	382'340	40'456	57'443'827
	Batterien	pro Jahr	15'269	253'222	225'001	28'221	48'575'957
	Ersatzbatterien	pro Jahr	11'900	197'357	175'362	21'995	37'859'288
	Ladestationen	pro Jahr	1'140	18'032	15'821	2'210	3'365'033
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	24'996	2'636'842	708'391	1'927'931	67'013'926
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	54'303'984
Total	Total	pro Jahr	81'437	3'528'250	1'506'916	2'020'812	268'562'016
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	31'648	475'646	430'133	45'513	64'624'306
	Batterien	pro Jahr	17'178	284'875	253'127	31'749	54'647'952
	Ersatzbatterien	pro Jahr	21'323	353'621	314'211	39'410	67'835'631
	Ladestationen	pro Jahr	1'283	20'285	17'799	2'486	3'785'662
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	25'096	2'647'460	711'243	1'935'694	67'283'768
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	54'522'648
Total	Total	pro Jahr	96'527	3'781'888	1'726'513	2'054'852	312'699'967

RV-B_SB_Int Strommix		Impact indicator	Climate change (IPCC2021) GWP 100 kg CO2 eq	Cumulative Energy demand total MJ	Cumulative Energy demand non-renewable MJ	Cumulative Energy demand renewable MJ	UBP total UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	17'594	259'488	235'378	24'111	34'744'127
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	2'844	53'174	51'660	1'514	6'479'431
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	152'812	15'567'343	4'239'807	11'324'478	414'738'089
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	883	0	0	0	123'745'333
Total	Total	pro Jahr	174'133	15'880'005	4'526'844	11'350'103	579'706'981
Diesel-Hybridbus (Euro 7)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	17'890	265'914	240'990	24'924	36'527'703
	Batterien	pro Jahr	191	3'165	2'813	353	607'199
	Ersatzbatterien	pro Jahr	191	3'165	2'813	353	607'199
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	80'631	4'640'475	4'621'389	19'086	161'227'413
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	268'250	0	0	0	373'241'643
Total	Total	pro Jahr	367'153	4'912'719	4'868'004	44'715	572'211'157
Brennstoffzellenbus (H2)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	17'090	256'852	232'275	24'577	34'897'607
	Batterien	pro Jahr	1'909	31'653	28'125	3'528	6'071'995
	Ersatzbatterien	pro Jahr	1'909	31'653	28'125	3'528	6'071'995
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	829	15'203	14'362	842	2'101'198
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	789	14'459	13'658	801	1'998'261
	Wasserstofftanks	pro Jahr	1'422	26'587	25'830	757	3'239'716
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	77'544	7'899'601	2'151'477	5'746'572	210'457'596
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	54'747'756
Total	Total	pro Jahr	101'491	8'276'008	2'493'852	5'780'604	319'586'123
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	17'090	256'852	232'275	24'577	34'897'607
	Batterien	pro Jahr	12'406	205'743	182'814	22'930	39'467'965
	Ersatzbatterien	pro Jahr	9'903	164'229	145'926	18'303	31'504'255
	Ladestationen	pro Jahr	1'140	18'032	15'821	2'210	3'365'033
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	23'969	2'528'551	679'298	1'848'753	64'261'765
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	54'747'756
Total	Total	pro Jahr	64'508	3'173'407	1'256'134	1'916'773	228'244'381
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	17'090	256'852	232'275	24'577	34'897'607
	Batterien	pro Jahr	12'406	205'743	182'814	22'930	39'467'965
	Ersatzbatterien	pro Jahr	15'334	254'300	225'959	28'341	48'782'608
	Ladestationen	pro Jahr	1'140	18'032	15'821	2'210	3'365'033
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	23'969	2'528'551	679'298	1'848'753	64'261'765
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	54'747'756
Total	Total	pro Jahr	69'939	3'263'478	1'336'167	1'926'811	245'522'734

Bahners_GB Strommix		Impact indicator	Climate change (IPCC2021) GWP 100 kg CO2 eq	Cumulative Energy demand total MJ	Cumulative Energy demand non-renewable MJ	Cumulative Energy demand renewable MJ	UBP total UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	36'030	531'407	482'030	49'377	71'152'556
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	4'740	88'623	86'099	2'523	10'799'052
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	158'804	16'177'713	4'406'043	11'768'492	430'999'294
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	930	0	0	0	122'375'378
Total	Total	pro Jahr	200'504	16'797'743	4'974'172	11'820'392	635'326'280
Diesel-Hybridbus (Euro 7)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	36'553	543'311	492'386	50'924	74'632'861
	Batterien	pro Jahr	239	3'957	3'516	441	758'999
	Ersatzbatterien	pro Jahr	239	3'957	3'516	441	758'999
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	105'054	6'046'041	6'021'175	24'866	210'062'045
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	348'019	0	0	0	448'373'047
Total	Total	pro Jahr	490'104	6'597'265	6'520'593	76'673	734'585'951
Brennstoffzellenbus (H2)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	35'165	528'495	477'925	50'570	71'804'784
	Batterien	pro Jahr	2'386	39'566	35'156	4'410	7'589'993
	Ersatzbatterien	pro Jahr	2'386	39'566	35'156	4'410	7'589'993
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	1'244	22'805	21'542	1'263	3'151'797
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	1'183	21'688	20'487	1'201	2'997'392
	Wasserstofftanks	pro Jahr	2'370	44'311	43'050	1'262	5'399'526
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	76'440	7'787'129	2'120'845	5'664'754	207'461'165
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	55'322'052
Total	Total	pro Jahr	121'173	8'483'561	2'754'162	5'727'868	361'316'703
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	38'681	581'345	525'718	55'627	78'985'263
	Batterien	pro Jahr	20'995	348'181	309'377	38'804	66'791'941
	Ersatzbatterien	pro Jahr	6'068	100'641	89'425	11'216	19'306'018
	Ladestationen	pro Jahr	1'568	24'793	21'755	3'039	4'626'921
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	25'127	2'650'660	712'103	1'938'034	67'365'098
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	55'322'052
Total	Total	pro Jahr	92'438	3'705'620	1'658'377	2'046'719	292'397'292
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	42'197	634'194	573'510	60'684	86'165'741
	Batterien	pro Jahr	22'903	379'834	337'502	42'331	72'863'936
	Ersatzbatterien	pro Jahr	15'884	263'420	234'062	29'357	50'532'142
	Ladestationen	pro Jahr	1'710	27'047	23'732	3'315	5'047'550
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	25'529	2'693'071	723'496	1'969'042	68'442'939
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	56'207'205
Total	Total	pro Jahr	108'223	3'997'565	1'892'304	2'104'730	339'259'513

Zusammensetzung UBP

OV_SB_HVZ-V Strommix									
		Impact indicator	UBP, Biotic Resources	UBP, Carcinogenic substances into air	UBP, Energy resources	UBP, Global warming	UBP, Heavy metals into air	UBP, Heavy metals into soil	UBP, Heavy metals into water
			UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'121'560	3'025'955	26'740'144	3'757'635	712'810	947'072
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	25'771	651'538	4'308'120	228'123	58'372	60'052
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	1'318'962	38'975'447	120'047'126	8'088'819	105'338'650	1'348'015
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	10'032	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	2'466'292	42'652'940	151'105'423	12'074'577	106'109'832	2'355'138
Diesel-Hybridbus (Euro 7)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'134'919	3'098'887	27'187'808	3'961'710	745'697	984'063
	Batterien	pro Jahr	0	24'388	36'511	288'946	249'940	5'565	5'697
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	24'388	36'511	288'946	249'940	5'565	5'697
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	344'936	38'828'160	84'929'270	1'839'554	563'971	300'022
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	270'299'423	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	1'528'630	42'000'069	382'994'393	6'301'145	1'320'798	1'295'480
Brennstoffzellenbus (H2)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'094'869	2'988'899	25'969'627	3'994'586	734'626	953'358
	Batterien	pro Jahr	0	243'881	365'111	2'889'458	2'499'404	55'653	56'973
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	243'881	365'111	2'889'458	2'499'404	55'653	56'973
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	8'910	92'024	628'690	26'732	14'958	39'483
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	8'473	87'516	597'891	25'423	14'225	37'549
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	12'885	325'769	2'154'060	114'062	29'186	30'026
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	535'688	15'829'627	48'756'368	3'285'222	42'782'615	547'487
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	2'148'586	20'054'057	83'885'551	12'444'833	43'686'916	1'721'850
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'094'869	2'988'899	25'969'627	3'994'586	734'626	953'358
	Batterien	pro Jahr	0	1'585'225	2'373'221	18'781'474	16'246'129	361'746	370'324
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	123'525	184'928	1'463'504	1'265'943	28'188	28'857
	Ladestationen	pro Jahr	0	48'867	205'811	1'728'247	797'386	42'785	65'884
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	171'361	6'034'581	18'088'056	994'803	16'522'786	172'559
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	3'023'847	11'787'441	66'030'908	23'298'847	17'690'132	1'590'981
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'094'869	2'988'899	25'969'627	3'994'586	734'626	953'358
	Batterien	pro Jahr	0	1'585'225	2'373'221	18'781'474	16'246'129	361'746	370'324
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	474'280	710'039	5'619'192	4'860'647	108'230	110'797
	Ladestationen	pro Jahr	0	48'867	205'811	1'728'247	797'386	42'785	65'884
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	171'361	6'034'581	18'088'056	994'803	16'522'786	172'559
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	3'374'602	12'312'552	70'186'596	26'893'551	17'770'174	1'672'921

OV_SB_HVZ-V Strommix									
		Impact indicator	UBP, Land use UBP	UBP, Main air pollutants and PM UBP	UBP, Mineral resources UBP	UBP, Noise UBP	UBP, Ozone layer depletion UBP	UBP, Pesticides into soil UBP	UBP, POP into water UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	225'572	6'095'695	1'563'960	168'876	15'739	18'406	126'826
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	9'282	1'013'717	25'296	13'795	4'238	2'007	18'260
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	972'238	16'738'658	7'835'098	701'679	91'927	66'605	203'031
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	32'258'243	0	72'000'000	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	1'207'092	56'106'313	9'424'354	72'884'349	111'904	87'018	348'118
Diesel-Hybridbus (Euro 7)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	240'311	6'261'823	2'942'355	177'961	16'771	19'118	131'681
	Batterien	pro Jahr	4'203	161'441	56'682	3'150	1'351	276	1'472
	Ersatzbatterien	pro Jahr	4'203	161'441	56'682	3'150	1'351	276	1'472
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	725'820	17'030'413	237'840	638'070	104'856	95'388	8'062'723
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	19'518'239	0	72'000'000	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	974'537	43'133'357	3'293'559	72'822'331	124'330	115'059	8'197'348
Brennstoffzellenbus (H2)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	236'921	5'826'830	2'432'657	173'455	16'810	16'919	129'913
	Batterien	pro Jahr	42'032	1'614'408	566'823	31'501	13'514	2'764	14'716
	Ersatzbatterien	pro Jahr	42'032	1'614'408	566'823	31'501	13'514	2'764	14'716
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	3'340	466'103	1'476'773	9'277	136'033	350	2'308
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	3'176	443'269	1'404'427	8'823	129'369	333	2'195
	Wasserstofftanks	pro Jahr	4'641	506'858	12'648	6'897	2'119	1'004	9'130
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	394'868	6'798'298	3'182'175	284'982	37'335	27'051	82'460
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	9'740'247	0	36'000'000	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	727'011	27'010'421	9'642'325	36'546'437	348'695	51'184	255'438
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	236'921	5'826'830	2'432'657	173'455	16'810	16'919	129'913
	Batterien	pro Jahr	273'208	10'493'652	3'684'347	204'758	87'843	17'964	95'656
	Ersatzbatterien	pro Jahr	21'289	817'694	287'095	15'955	6'845	1'400	7'454
	Ladestationen	pro Jahr	23'755	770'234	900'466	16'703	2'058	1'127	7'427
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	146'249	2'192'958	467'714	94'091	14'057	9'281	27'527
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	9'740'247	0	36'000'000	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	701'421	29'841'615	7'772'279	36'504'962	127'612	46'690	267'977
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	236'921	5'826'830	2'432'657	173'455	16'810	16'919	129'913
	Batterien	pro Jahr	273'208	10'493'652	3'684'347	204'758	87'843	17'964	95'656
	Ersatzbatterien	pro Jahr	81'740	3'139'575	1'102'313	61'261	26'281	5'374	28'619
	Ladestationen	pro Jahr	23'755	770'234	900'466	16'703	2'058	1'127	7'427
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	146'249	2'192'958	467'714	94'091	14'057	9'281	27'527
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	9'740'247	0	36'000'000	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	761'873	32'163'496	8'587'498	36'550'268	147'049	50'664	289'143

OV_SB_HVZ-V Strommix			Impact indicator	UBP, Radioactive substances into air UBP	UBP, Radioactive substances into water UBP	UBP, Radioactive waste to deposit UBP	UBP, Waste, non radioactive UBP	UBP, Water pollutants UBP	UBP, Water resources, evaporated UBP	UBP, Water resources, net balance UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		81	185'442	3'159'757	3'600'627	567'005	83'029	0
	Batterien	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr		5	11'532	197'477	2'570'674	513'535	7'353	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		443	776'935	14'128'215	5'308'041	3'031'498	232'598	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		528	973'909	17'485'449	11'479'342	4'112'037	322'979	0
Diesel-Hybridbus (Euro 7)										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		84	193'411	3'295'883	3'717'925	595'820	85'328	0
	Batterien	pro Jahr		1	1'390	25'113	15'893	27'180	1'599	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		1	1'390	25'113	15'893	27'180	1'599	0
	Ladestationen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		66	141'206	2'458'642	266'736	6'087'335	267'618	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		152	337'398	5'804'751	4'016'447	6'737'514	356'145	0
Brennstoffzellenbus (H2)										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		83	189'989	3'238'220	3'687'656	577'738	83'256	0
	Batterien	pro Jahr		8	13'903	251'128	158'928	271'796	15'991	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		8	13'903	251'128	158'928	271'796	15'991	0
	Ladestationen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		2	3'698	63'119	138'375	38'748	2'870	3
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		2	3'517	60'027	131'596	36'850	2'730	3
	Wasserstofftanks	pro Jahr		3	5'766	98'738	1'285'337	256'768	3'676	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		180	315'547	5'738'084	2'155'827	1'231'223	94'468	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		285	546'321	9'700'444	7'716'646	2'684'920	218'982	6
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung								
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		83	189'989	3'238'220	3'687'656	577'738	83'256	0
	Batterien	pro Jahr		54	90'366	1'632'330	1'033'032	1'766'677	103'942	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		4	7'042	127'196	80'497	137'664	8'099	0
	Ladestationen	pro Jahr		6	12'672	215'545	160'175	43'832	4'571	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		68	117'716	2'145'824	748'450	452'169	34'891	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		214	417'784	7'359'114	5'709'810	2'978'080	234'760	0
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung								
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		83	189'989	3'238'220	3'687'656	577'738	83'256	0
	Batterien	pro Jahr		54	90'366	1'632'330	1'033'032	1'766'677	103'942	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		16	27'037	488'373	309'071	528'568	31'098	0
	Ladestationen	pro Jahr		6	12'672	215'545	160'175	43'832	4'571	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		68	117'716	2'145'824	748'450	452'169	34'891	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		226	437'779	7'720'292	5'938'384	3'368'984	257'759	0

OV_SB_HVZ-V Strommix		Impact indicator	Life cycle CO2 kg CO2	Life cycle NOx kg NOx	Life cycle PM kg PM10
Wasserstoffverbrennungsbuss					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	22'310	34	24
	Batterien	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	3'713	13	2
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	98'453	143	64
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	2	201
Total	Total	pro Jahr	124'476	191	291
Diesel-Hybridbus (Euro 7)					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	22'712	35	24
	Batterien	pro Jahr	250	1	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	250	1	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	36'912	131	13
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	258'923	2	121
Total	Total	pro Jahr	319'047	169	158
Brennstoffzellenbus (H2)					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	21'676	33	23
	Batterien	pro Jahr	2'501	7	4
	Ersatzbatterien	pro Jahr	2'501	7	4
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	506	1	1
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	481	1	1
	Wasserstofftanks	pro Jahr	1'856	6	1
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	39'986	58	26
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	61
Total	Total	pro Jahr	69'507	113	120
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung			
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	21'676	33	23
	Batterien	pro Jahr	16'256	44	25
	Ersatzbatterien	pro Jahr	1'267	3	2
	Ladestationen	pro Jahr	1'510	3	3
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	14'783	21	9
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	61
Total	Total	pro Jahr	55'492	105	124
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung			
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	21'676	33	23
	Batterien	pro Jahr	16'256	44	25
	Ersatzbatterien	pro Jahr	4'864	13	8
	Ladestationen	pro Jahr	1'510	3	3
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	14'783	21	9
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	61
Total	Total	pro Jahr	59'089	114	129

OV_GB_Int Strommix		Impact indicator	UBP, Biotic Resources	UBP, Carcinogenic substances into air	UBP, Energy resources	UBP, Global warming	UBP, Heavy metals into air	UBP, Heavy metals into soil	UBP, Heavy metals into water
			UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	2'449'967	6'609'983	58'411'931	8'208'285	1'557'082	2'068'810
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	45'815	1'158'291	7'658'881	405'552	103'773	106'759
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	3'108'843	91'866'615	282'955'658	19'065'655	248'287'217	3'177'322
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	25'904	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	5'604'625	99'634'889	349'052'374	27'679'492	249'948'072	5'352'891
Diesel-Hybridbus (Euro 7)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	2'473'439	6'753'706	59'253'041	8'634'141	1'625'170	2'144'664
	Batterien	pro Jahr	0	32'517	48'681	385'261	333'254	7'420	7'596
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	32'517	48'681	385'261	333'254	7'420	7'596
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	756'674	85'176'035	186'306'499	4'035'368	1'237'163	658'149
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	593'736'979	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	3'295'147	92'027'104	840'067'041	13'336'017	2'877'175	2'818'006
Brennstoffzellenbus (H2)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	2'402'972	6'559'907	56'997'022	8'767'145	1'612'326	2'092'388
	Batterien	pro Jahr	0	325'174	486'815	3'852'610	3'332'539	74'204	75'964
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	325'174	486'815	3'852'610	3'332'539	74'204	75'964
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	14'255	147'239	1'005'904	42'772	23'932	63'174
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	13'557	140'026	956'625	40'676	22'760	60'079
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	22'907	579'145	3'829'440	202'776	51'886	53'379
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	1'286'673	38'021'310	117'108'318	7'890'801	102'759'912	1'315'015
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	4'390'713	46'421'257	187'602'530	23'609'249	104'619'224	3'735'963
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	2'402'972	6'559'907	56'997'022	8'767'145	1'612'326	2'092'388
	Batterien	pro Jahr	0	2'601'395	3'894'517	30'820'881	26'660'314	593'634	607'711
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	1'544'339	2'312'012	18'297'068	15'827'113	352'416	360'773
	Ladestationen	pro Jahr	0	65'156	274'415	2'304'329	1'063'181	57'047	87'846
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	411'764	14'500'498	43'463'795	2'390'413	39'702'609	414'641
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	7'025'625	27'541'348	151'883'095	54'708'167	42'318'032	3'563'360
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	2'703'343	7'379'895	64'121'650	9'863'039	1'813'866	2'353'937
	Batterien	pro Jahr	0	2'926'569	4'381'331	34'673'491	29'992'853	667'838	683'675
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	3'130'208	4'686'198	37'086'177	32'079'846	714'309	731'247
	Ladestationen	pro Jahr	0	73'300	308'717	2'592'370	1'196'079	64'178	98'827
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	414'333	14'590'981	43'735'009	2'405'329	39'950'353	417'228
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	9'247'753	31'347'122	182'208'697	75'537'145	43'210'545	4'284'915

OV_GB_Int Strommix		Impact indicator	UBP, Land use UBP	UBP, Main air pollutants and PM UBP	UBP, Mineral resources UBP	UBP, Noise UBP	UBP, Ozone layer depletion UBP	UBP, Pesticides into soil UBP	UBP, POP into water UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	492'747	13'315'610	3'416'359	368'898	34'381	40'206	277'042
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	16'501	1'802'163	44'970	24'524	7'534	3'568	32'463
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	2'291'601	39'453'655	18'467'625	1'653'884	216'674	156'991	478'553
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	87'968'318	0	126'000'000	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	2'800'849	142'539'746	21'928'954	128'047'305	258'590	200'765	788'057
Diesel-Hybridbus (Euro 7)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	523'733	13'647'002	6'412'560	387'848	36'551	41'667	286'986
	Batterien	pro Jahr	5'604	215'254	75'576	4'200	1'802	368	1'962
	Ersatzbatterien	pro Jahr	5'604	215'254	75'576	4'200	1'802	368	1'962
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	1'592'207	37'359'046	521'743	1'399'712	230'019	209'249	17'686'926
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	31'068'764	0	126'000'000	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	2'127'148	82'505'321	7'085'455	127'795'961	270'174	251'652	17'977'836
Brennstoffzellenbus (H2)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	519'984	12'788'476	5'339'092	380'691	36'894	37'132	285'127
	Batterien	pro Jahr	56'043	2'152'544	755'764	42'002	18'019	3'685	19'622
	Ersatzbatterien	pro Jahr	56'043	2'152'544	755'764	42'002	18'019	3'685	19'622
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	5'344	745'765	2'362'837	14'843	217'653	560	3'693
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	5'082	709'230	2'247'083	14'116	206'990	533	3'512
	Wasserstofftanks	pro Jahr	8'251	901'081	22'485	12'262	3'767	1'784	16'231
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	948'437	16'328'888	7'643'291	684'501	89'676	64'975	198'061
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	24'674'570	0	63'000'000	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	1'599'183	60'453'098	19'126'315	64'190'417	591'019	112'354	545'868
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	519'984	12'788'476	5'339'092	380'691	36'894	37'132	285'127
	Batterien	pro Jahr	448'341	17'220'352	6'046'109	336'014	144'152	29'479	156'975
	Ersatzbatterien	pro Jahr	266'161	10'223'003	3'589'322	199'477	85'577	17'500	93'189
	Ladestationen	pro Jahr	31'673	1'026'978	1'200'622	22'270	2'744	1'503	9'902
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	351'421	5'269'459	1'123'870	226'092	33'777	22'300	66'146
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	24'674'570	0	63'000'000	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	1'617'580	71'202'838	17'299'014	64'164'544	303'144	107'914	611'339
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	584'983	14'387'036	6'006'478	428'278	41'506	41'774	320'768
	Batterien	pro Jahr	504'383	19'372'896	6'801'872	378'015	162'171	33'164	176'596
	Ersatzbatterien	pro Jahr	539'480	20'720'921	7'275'167	404'319	173'455	35'471	188'885
	Ladestationen	pro Jahr	35'632	1'155'350	1'350'700	25'054	3'087	1'690	11'140
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	353'613	5'302'341	1'130'883	227'503	33'987	22'440	66'558
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	24'828'539	0	63'393'120	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	2'018'092	85'767'082	22'565'100	64'856'289	414'207	134'538	763'947

OV_GB_Int Strommix		Impact indicator	UBP, Radioactive substances into air UBP	UBP, Radioactive substances into water UBP	UBP, Radioactive waste to deposit UBP	UBP, Waste, non radioactive UBP	UBP, Water pollutants UBP	UBP, Water resources, evaporated UBP	UBP, Water resources, net balance UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	176	405'085	6'902'264	7'865'313	1'238'581	181'371	0
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	9	20'501	351'070	4'570'087	912'951	13'071	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	1'043	1'831'264	33'300'742	12'511'255	7'145'355	548'241	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	1'229	2'256'851	40'554'075	24'946'655	9'296'888	742'684	0
Diesel-Hybridbus (Euro 7)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	184	421'519	7'183'039	8'102'836	1'298'528	185'964	0
	Batterien	pro Jahr	1	1'854	33'484	21'190	36'240	2'132	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	1	1'854	33'484	21'190	36'240	2'132	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	144	309'760	5'393'441	585'131	13'353'583	587'065	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	330	734'986	12'643'448	8'730'348	14'724'590	777'294	0
Brennstoffzellenbus (H2)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	182	416'980	7'107'107	8'093'509	1'267'994	182'727	0
	Batterien	pro Jahr	11	18'537	334'837	211'904	362'395	21'321	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	11	18'537	334'837	211'904	362'395	21'321	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	3	5'917	100'991	221'400	61'997	4'593	5
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	2	5'627	96'043	210'553	58'960	4'368	5
	Wasserstofftanks	pro Jahr	5	10'251	175'535	2'285'044	456'476	6'536	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	432	757'915	13'782'350	5'178'098	2'957'285	226'903	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	645	1'233'762	21'931'700	16'412'411	5'527'503	467'769	9
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	182	416'980	7'107'107	8'093'509	1'267'994	182'727	0
	Batterien	pro Jahr	89	148'293	2'678'695	1'695'232	2'899'162	170'571	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	53	88'036	1'590'229	1'006'388	1'721'111	101'261	0
	Ladestationen	pro Jahr	7	16'896	287'393	213'567	58'443	6'095	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	162	282'859	5'156'201	1'798'451	1'086'517	83'840	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	493	953'063	16'819'625	12'807'148	7'033'227	544'494	0
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	204	469'102	7'995'496	9'105'198	1'426'493	205'567	0
	Batterien	pro Jahr	100	166'830	3'013'532	1'907'136	3'261'557	191'893	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	107	178'439	3'223'222	2'039'840	3'488'506	205'245	0
	Ladestationen	pro Jahr	8	19'007	323'317	240'263	65'748	6'857	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	163	284'624	5'188'375	1'809'674	1'093'297	84'363	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	583	1'118'002	19'743'942	15'102'111	9'335'601	693'926	0

OV_GB_Int Strommix		Impact indicator	Life cycle CO2 kg CO2	Life cycle NOx kg NOx	Life cycle PM kg PM10
Wasserstoffverbrennungsbuss					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	48'735	75	52
	Batterien	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	6'600	22	4
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	232'058	336	151
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	4	549
Total	Total	pro Jahr	287'393	438	756
Diesel-Hybridbus (Euro 7)					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	49'499	77	53
	Batterien	pro Jahr	333	1	1
	Ersatzbatterien	pro Jahr	333	1	1
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	80'972	287	29
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	567'991	4	190
Total	Total	pro Jahr	699'129	370	273
Brennstoffzellenbus (H2)					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	47'574	73	51
	Batterien	pro Jahr	3'335	9	5
	Ersatzbatterien	pro Jahr	3'335	9	5
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	809	2	1
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	769	2	1
	Wasserstofftanks	pro Jahr	3'300	11	2
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	96'043	139	63
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	154
Total	Total	pro Jahr	155'165	245	282
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung			
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	47'574	73	51
	Batterien	pro Jahr	26'677	72	41
	Ersatzbatterien	pro Jahr	15'837	42	25
	Ladestationen	pro Jahr	2'013	5	4
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	35'522	51	21
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	154
Total	Total	pro Jahr	127'623	242	297
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung			
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	53'521	82	58
	Batterien	pro Jahr	30'012	80	47
	Ersatzbatterien	pro Jahr	32'100	86	50
	Ladestationen	pro Jahr	2'265	5	5
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	35'743	51	22
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	155
Total	Total	pro Jahr	153'641	305	336

RV-M_GB_Int Strommix		Impact indicator	UBP, Biotic Resources	UBP, Carcinogenic substances into air	UBP, Energy resources	UBP, Global warming	UBP, Heavy metals into air	UBP, Heavy metals into soil	UBP, Heavy metals into water
			UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'224'983	3'304'991	29'205'965	4'104'142	778'541	1'034'405
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	22'907	579'145	3'829'440	202'776	51'886	53'379
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	1'713'745	50'641'320	155'978'839	10'509'911	136'867'918	1'751'493
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	16'095	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	2'961'636	54'525'456	189'030'340	14'816'829	137'698'345	2'839'278
Diesel-Hybridbus (Euro 7)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'236'719	3'376'853	29'626'520	4'317'070	812'585	1'072'332
	Batterien	pro Jahr	0	16'259	24'341	192'631	166'627	3'710	3'798
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	16'259	24'341	192'631	166'627	3'710	3'798
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	431'947	48'622'746	106'353'079	2'303'590	706'235	375'704
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	336'697'386	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	1'701'184	52'048'281	473'062'247	6'953'915	1'526'240	1'455'633
Brennstoffzellenbus (H2)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'201'486	3'279'954	28'498'511	4'383'573	806'163	1'046'194
	Batterien	pro Jahr	0	162'587	243'407	1'926'305	1'666'270	37'102	37'982
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	162'587	243'407	1'926'305	1'666'270	37'102	37'982
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	7'128	73'620	502'952	21'386	11'966	31'587
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	6'778	70'013	478'313	20'338	11'380	30'039
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	11'454	289'573	1'914'720	101'388	25'943	26'690
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	797'249	23'558'796	72'562'755	4'889'305	63'672'183	814'810
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	2'349'269	27'758'769	107'809'861	12'748'529	64'601'839	2'025'284
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'201'486	3'279'954	28'498'511	4'383'573	806'163	1'046'194
	Batterien	pro Jahr	0	1'300'697	1'947'258	15'410'441	13'330'157	296'817	303'856
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	1'013'742	1'517'661	12'010'639	10'389'301	231'334	236'820
	Ladestationen	pro Jahr	0	32'578	137'207	1'152'164	531'591	28'524	43'923
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	237'092	8'349'330	25'026'285	1'376'391	22'860'609	238'749
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	3'785'594	15'231'410	82'098'040	30'011'012	24'223'446	1'869'542
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'351'672	3'689'948	32'060'825	4'931'519	906'933	1'176'969
	Batterien	pro Jahr	0	1'463'284	2'190'666	17'336'746	14'996'426	333'919	341'838
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	1'816'405	2'719'318	21'520'460	18'615'374	414'501	424'330
	Ladestationen	pro Jahr	0	36'650	154'358	1'296'185	598'039	32'089	49'413
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	238'047	8'382'950	25'127'057	1'381'933	22'952'661	239'710
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	4'906'058	17'137'241	97'341'273	40'523'292	24'640'103	2'232'260

RV-M_GB_Int Strommix										
		Impact indicator	UBP, Land use	UBP, Main air pollutants and PM	UBP, Mineral resources	UBP, Noise	UBP, Ozone layer depletion	UBP, Pesticides into soil	UBP, POP into water	
			UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	
Wasserstoffverbrennungsbuss										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	246'373	6'657'805	1'708'179	184'449	17'191	20'103	138'521	
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
Treibstoffbereitstellung	Wasserstofftanks	pro Jahr	8'251	901'081	22'485	12'262	3'767	1'784	16'231	
Betrieb	Treibstoff/Strom	pro Jahr	1'263'241	21'748'762	10'180'248	911'701	119'441	86'541	263'801	
Total	Betrieb	pro Jahr	0	42'556'067	0	81'000'000	0	0	0	
	Total	pro Jahr	1'517'865	71'863'715	11'910'912	82'108'411	140'399	108'428	418'554	
Diesel-Hybridbus (Euro 7)										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	261'866	6'823'501	3'206'280	193'924	18'276	20'833	143'493	
	Batterien	pro Jahr	2'802	107'627	37'788	2'100	901	184	981	
	Ersatzbatterien	pro Jahr	2'802	107'627	37'788	2'100	901	184	981	
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
Treibstoffbereitstellung	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
Betrieb	Treibstoff/Strom	pro Jahr	908'912	21'326'414	297'837	799'026	131'306	119'450	10'096'583	
Total	Betrieb	pro Jahr	0	22'672'131	0	81'000'000	0	0	0	
	Total	pro Jahr	1'176'382	51'037'301	3'579'693	81'997'150	151'384	140'652	10'242'038	
Brennstoffzellenbus (H2)										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	259'992	6'394'238	2'669'546	190'346	18'447	18'566	142'564	
	Batterien	pro Jahr	28'021	1'076'272	377'882	21'001	9'010	1'842	9'811	
	Ersatzbatterien	pro Jahr	28'021	1'076'272	377'882	21'001	9'010	1'842	9'811	
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
	Brennstoffzellen	pro Jahr	2'672	372'882	1'181'419	7'422	108'827	280	1'846	
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	2'541	354'615	1'123'541	7'058	103'495	266	1'756	
Treibstoffbereitstellung	Wasserstofftanks	pro Jahr	4'125	450'541	11'243	6'131	1'884	892	8'116	
Betrieb	Treibstoff/Strom	pro Jahr	587'671	10'117'719	4'735'943	424'131	55'565	40'260	122'723	
Total	Betrieb	pro Jahr	0	13'803'984	0	40'500'000	0	0	0	
	Total	pro Jahr	913'045	33'646'523	10'477'454	41'177'089	306'236	63'949	296'626	
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung								
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	259'992	6'394'238	2'669'546	190'346	18'447	18'566	142'564	
	Batterien	pro Jahr	224'170	8'610'176	3'023'054	168'007	72'076	14'739	78'487	
	Ersatzbatterien	pro Jahr	174'715	6'710'627	2'356'118	130'942	56'175	11'488	61'172	
	Ladestationen	pro Jahr	15'837	513'489	600'311	11'135	1'372	751	4'951	
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
Treibstoffbereitstellung	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
Betrieb	Treibstoff/Strom	pro Jahr	202'347	3'034'134	647'120	130'183	19'448	12'840	38'086	
Total	Betrieb	pro Jahr	0	13'803'984	0	40'500'000	0	0	0	
	Total	pro Jahr	877'060	39'066'648	9'296'149	41'130'612	167'518	58'385	325'260	
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung								
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	292'491	7'193'518	3'003'239	214'139	20'753	20'887	160'384	
	Batterien	pro Jahr	252'192	9'686'448	3'400'936	189'008	81'086	16'582	88'298	
	Ersatzbatterien	pro Jahr	313'051	12'023'988	4'221'652	234'619	100'653	20'583	109'606	
	Ladestationen	pro Jahr	17'816	577'675	675'350	12'527	1'544	845	5'570	
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
Treibstoffbereitstellung	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	
Betrieb	Treibstoff/Strom	pro Jahr	203'161	3'046'352	649'726	130'707	19'527	12'892	38'240	
Total	Betrieb	pro Jahr	0	13'859'568	0	40'663'080	0	0	0	
	Total	pro Jahr	1'078'711	46'387'549	11'950'903	41'444'080	223'562	71'789	402'098	

RV-M_GB_Int Strommix			Impact indicator	UBP, Radioactive substances into air UBP	UBP, Radioactive substances into water UBP	UBP, Radioactive waste to deposit UBP	UBP, Waste, non radioactive UBP	UBP, Water pollutants UBP	UBP, Water resources, evaporated UBP	UBP, Water resources, net balance UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		88	202'543	3'451'132	3'932'656	619'290	90'686	0
	Batterien	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr		5	10'251	175'535	2'285'044	456'476	6'536	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		575	1'009'481	18'356'979	6'896'809	3'938'865	302'217	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		668	1'222'275	21'983'646	13'114'509	5'014'632	399'438	0
Diesel-Hybridbus (Euro 7)										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		92	210'760	3'591'520	4'051'418	649'264	92'982	0
	Batterien	pro Jahr		1	927	16'742	10'595	18'120	1'066	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		1	927	16'742	10'595	18'120	1'066	0
	Ladestationen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		82	176'826	3'078'846	334'022	7'622'894	335'126	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		175	389'440	6'703'850	4'406'631	8'308'397	430'240	0
Brennstoffzellenbus (H2)										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		91	208'490	3'553'554	4'046'755	633'997	91'363	0
	Batterien	pro Jahr		6	9'268	167'418	105'952	181'198	10'661	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		6	9'268	167'418	105'952	181'198	10'661	0
	Ladestationen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		1	2'958	50'495	110'700	30'999	2'296	2
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		1	2'813	48'022	105'277	29'480	2'184	2
	Wasserstofftanks	pro Jahr		2	5'125	87'767	1'142'522	228'238	3'268	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		268	469'620	8'539'831	3'208'457	1'832'395	140'594	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		374	707'543	12'614'506	8'825'614	3'117'504	261'027	5
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung								
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		91	208'490	3'553'554	4'046'755	633'997	91'363	0
	Batterien	pro Jahr		44	74'147	1'339'347	847'616	1'449'581	85'286	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		35	57'789	1'043'865	660'618	1'129'779	66'470	0
	Ladestationen	pro Jahr		4	8'448	143'697	106'783	29'221	3'047	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		94	162'869	2'968'920	1'035'541	625'612	48'275	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		267	511'742	9'049'383	6'697'313	3'868'191	294'442	0
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung								
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		102	234'551	3'997'748	4'552'599	713'247	102'784	0
	Batterien	pro Jahr		50	83'415	1'506'766	953'568	1'630'778	95'946	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		62	103'545	1'870'380	1'183'684	2'024'319	119'100	0
	Ladestationen	pro Jahr		4	9'504	161'659	120'131	32'874	3'428	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		94	163'525	2'980'875	1'039'711	628'132	48'469	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		312	594'540	10'517'427	7'849'693	5'029'350	369'728	0

RV-M_GB_Int Strommix		Impact indicator	Life cycle CO2 kg CO2	Life cycle NOx kg NOx	Life cycle PM kg PM10
Wasserstoffverbrennungsbuss					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	24'367	37	26
	Batterien	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	3'300	11	2
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	127'921	185	84
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	3	265
Total	Total	pro Jahr	155'589	237	377
Diesel-Hybridbus (Euro 7)					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	24'749	38	26
	Batterien	pro Jahr	167	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	167	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	46'223	164	16
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	324'238	3	140
Total	Total	pro Jahr	395'543	206	183
Brennstoffzellenbus (H2)					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	23'787	36	26
	Batterien	pro Jahr	1'667	4	3
	Ersatzbatterien	pro Jahr	1'667	4	3
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	404	1	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	385	1	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	1'650	6	1
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	59'510	86	39
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	86
Total	Total	pro Jahr	89'071	139	158
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung			
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	23'787	36	26
	Batterien	pro Jahr	13'338	36	21
	Ersatzbatterien	pro Jahr	10'396	28	16
	Ladestationen	pro Jahr	1'007	2	2
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	20'453	29	12
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	86
Total	Total	pro Jahr	68'981	132	163
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung			
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	26'761	41	29
	Batterien	pro Jahr	15'006	40	23
	Ersatzbatterien	pro Jahr	18'627	50	29
	Ladestationen	pro Jahr	1'132	3	3
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	20'536	29	12
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	87
Total	Total	pro Jahr	82'061	163	183

RV-B_SB_Int Strommix		Impact indicator	UBP, Biotic Resources	UBP, Carcinogenic substances into air	UBP, Energy resources	UBP, Global warming	UBP, Heavy metals into air	UBP, Heavy metals into soil	UBP, Heavy metals into water
			UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	747'706	2'017'303	17'826'763	2'505'090	475'206	631'381
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	17'181	434'359	2'872'080	152'082	38'915	40'035
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	1'682'094	49'706'041	153'098'113	10'315'807	134'340'146	1'719'146
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	16'454	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	2'446'981	52'157'703	173'813'410	12'972'979	134'854'267	2'390'561
Diesel-Hybridbus (Euro 7)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	756'612	2'065'925	18'125'205	2'641'140	497'131	656'042
	Batterien	pro Jahr	0	16'259	24'341	192'631	166'627	3'710	3'798
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	16'259	24'341	192'631	166'627	3'710	3'798
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	341'347	38'424'152	84'045'579	1'820'414	558'102	296'901
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	266'618'194	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	1'130'476	40'538'758	369'174'240	4'794'807	1'062'654	960'539
Brennstoffzellenbus (H2)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	729'913	1'992'599	17'313'085	2'663'057	489'751	635'572
	Batterien	pro Jahr	0	162'587	243'407	1'926'305	1'666'270	37'102	37'982
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	162'587	243'407	1'926'305	1'666'270	37'102	37'982
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	5'940	61'350	419'127	17'821	9'972	26'322
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	5'649	58'344	398'594	16'948	9'483	25'033
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	8'590	217'179	1'436'040	76'041	19'457	20'017
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	853'574	25'223'181	77'689'177	5'234'725	68'170'503	872'375
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	1'928'839	28'039'468	101'108'632	11'341'132	68'773'370	1'655'283
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	729'913	1'992'599	17'313'085	2'663'057	489'751	635'572
	Batterien	pro Jahr	0	1'056'817	1'582'147	12'520'983	10'830'752	241'164	246'883
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	843'576	1'262'907	9'994'542	8'645'360	192'503	197'068
	Ladestationen	pro Jahr	0	32'578	137'207	1'152'164	531'591	28'524	43'923
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	227'355	8'006'436	23'998'493	1'319'864	21'921'758	228'944
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	2'890'238	12'981'297	64'979'267	23'990'625	22'873'699	1'352'389
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	729'913	1'992'599	17'313'085	2'663'057	489'751	635'572
	Batterien	pro Jahr	0	1'056'817	1'582'147	12'520'983	10'830'752	241'164	246'883
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	1'306'231	1'955'542	15'475'999	13'386'866	298'080	305'148
	Ladestationen	pro Jahr	0	32'578	137'207	1'152'164	531'591	28'524	43'923
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	227'355	8'006'436	23'998'493	1'319'864	21'921'758	228'944
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	3'352'893	13'673'932	70'460'724	28'732'130	22'979'276	1'460'469

RV-B_SB_Int Strommix										
		Impact indicator	UBP, Land use	UBP, Main air pollutants and PM	UBP, Mineral resources	UBP, Noise	UBP, Ozone layer depletion	UBP, Pesticides into soil	UBP, POP into water	
			UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	
Wasserstoffverbrennungsbuss										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	150'382	4'063'797	1'042'640	112'584	10'493	12'270	84'551	
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	6'188	675'811	16'864	9'196	2'825	1'338	12'174	
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	1'239'911	21'347'091	9'992'232	894'863	117'235	84'943	258'929	
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	42'728'879	0	81'000'000	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	1'396'481	68'815'578	11'051'736	82'016'643	130'554	98'551	355'653	
Diesel-Hybridbus (Euro 7)										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	160'207	4'174'549	1'961'570	118'641	11'181	12'746	87'787	
	Batterien	pro Jahr	2'802	107'627	37'788	2'100	901	184	981	
	Ersatzbatterien	pro Jahr	2'802	107'627	37'788	2'100	901	184	981	
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	718'268	16'853'211	235'366	631'431	103'765	94'395	7'978'830	
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	25'623'449	0	81'000'000	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	884'079	46'866'462	2'272'512	81'754'272	116'748	107'509	8'068'580	
Brennstoffzellenbus (H2)										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	157'947	3'884'553	1'621'772	115'637	11'207	11'279	86'609	
	Batterien	pro Jahr	28'021	1'076'272	377'882	21'001	9'010	1'842	9'811	
	Ersatzbatterien	pro Jahr	28'021	1'076'272	377'882	21'001	9'010	1'842	9'811	
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	2'227	310'735	984'515	6'185	90'689	233	1'539	
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	2'118	295'512	936'284	5'882	86'246	222	1'463	
	Wasserstofftanks	pro Jahr	3'094	337'906	8'432	4'598	1'413	669	6'087	
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	629'189	10'832'517	5'070'528	454'095	59'491	43'104	131'393	
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	14'247'756	0	40'500'000	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	850'617	32'061'523	9'377'295	41'128'398	267'064	59'192	246'712	
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)										
Produktion und Entsorgung	rasche Batterieentwicklung									
	Fahrzeuge	pro Jahr	157'947	3'884'553	1'621'772	115'637	11'207	11'279	86'609	
	Batterien	pro Jahr	182'138	6'995'768	2'456'232	136'506	58'562	11'976	63'771	
	Ersatzbatterien	pro Jahr	145'387	5'584'186	1'960'622	108'962	46'745	9'559	50'903	
	Ladestationen	pro Jahr	15'837	513'489	600'311	11'135	1'372	751	4'951	
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	194'037	2'909'527	620'544	124'837	18'650	12'313	36'522	
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	14'247'756	0	40'500'000	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	695'346	34'135'279	7'259'479	40'997'076	136'536	45'879	242'756	
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)										
Produktion und Entsorgung	langsame Batterieentwicklung									
	Fahrzeuge	pro Jahr	157'947	3'884'553	1'621'772	115'637	11'207	11'279	86'609	
	Batterien	pro Jahr	182'138	6'995'768	2'456'232	136'506	58'562	11'976	63'771	
	Ersatzbatterien	pro Jahr	225'124	8'646'805	3'035'915	168'722	72'383	14'802	78'821	
	Ladestationen	pro Jahr	15'837	513'489	600'311	11'135	1'372	751	4'951	
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	194'037	2'909'527	620'544	124'837	18'650	12'313	36'522	
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	14'247'756	0	40'500'000	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	775'083	37'197'898	8'334'773	41'056'835	162'173	51'121	270'674	

RV-B_SB_Int Strommix			Impact indicator	UBP, Radioactive substances into air UBP	UBP, Radioactive substances into water UBP	UBP, Radioactive waste to deposit UBP	UBP, Waste, non radioactive UBP	UBP, Water pollutants UBP	UBP, Water resources, evaporated UBP	UBP, Water resources, net balance UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		54	123'628	2'106'505	2'400'418	378'003	55'353	0
	Batterien	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr		3	7'688	131'651	1'713'783	342'357	4'902	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		564	990'838	18'017'949	6'769'434	3'866'120	296'636	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		622	1'122'154	20'256'105	10'883'634	4'586'479	356'890	0
Diesel-Hybridbus (Euro 7)										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		56	128'941	2'197'255	2'478'617	397'213	56'885	0
	Batterien	pro Jahr		1	927	16'742	10'595	18'120	1'066	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		1	927	16'742	10'595	18'120	1'066	0
	Ladestationen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		65	139'737	2'433'060	263'961	6'023'996	264'834	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		122	270'531	4'663'799	2'763'768	6'457'449	323'851	0
Brennstoffzellenbus (H2)										
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		55	126'659	2'158'814	2'458'437	385'159	55'504	0
	Batterien	pro Jahr		6	9'268	167'418	105'952	181'198	10'661	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		6	9'268	167'418	105'952	181'198	10'661	0
	Ladestationen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		1	2'465	42'080	92'250	25'832	1'914	2
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		1	2'344	40'018	87'731	24'567	1'820	2
	Wasserstofftanks	pro Jahr		2	3'844	65'826	856'891	171'178	2'451	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		286	502'798	9'143'154	3'435'129	1'961'851	150'527	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		357	656'647	11'784'728	7'142'342	2'930'982	233'536	4
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung								
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		55	126'659	2'158'814	2'458'437	385'159	55'504	0
	Batterien	pro Jahr		36	60'244	1'088'220	688'688	1'177'784	69'295	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		29	48'088	868'643	549'727	940'135	55'313	0
	Ladestationen	pro Jahr		4	8'448	143'697	106'783	29'221	3'047	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		90	156'180	2'846'991	993'013	599'920	46'292	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		213	399'620	7'106'364	4'796'649	3'132'219	229'451	0
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung								
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr		55	126'659	2'158'814	2'458'437	385'159	55'504	0
	Batterien	pro Jahr		36	60'244	1'088'220	688'688	1'177'784	69'295	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr		45	74'462	1'345'045	851'222	1'455'748	85'649	0
	Ladestationen	pro Jahr		4	8'448	143'697	106'783	29'221	3'047	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr		90	156'180	2'846'991	993'013	599'920	46'292	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr		0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr		229	425'994	7'582'767	5'098'144	3'647'832	259'787	0

RV-B_SB_Int Strommix		Impact indicator	Life cycle CO2 kg CO2	Life cycle NOx kg NOx	Life cycle PM kg PM10
Wasserstoffverbrennungsbuss					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	14'873	23	16
	Batterien	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	2'475	8	1
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	125'559	182	82
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	4	266
Total	Total	pro Jahr	142'907	217	365
Diesel-Hybridbus (Euro 7)					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	15'141	23	16
	Batterien	pro Jahr	167	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	167	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	36'528	129	13
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	256'229	4	158
Total	Total	pro Jahr	308'232	157	187
Brennstoffzellenbus (H2)					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	14'451	22	16
	Batterien	pro Jahr	1'667	4	3
	Ersatzbatterien	pro Jahr	1'667	4	3
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	337	1	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	321	1	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	1'238	4	1
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	63'715	92	42
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	89
Total	Total	pro Jahr	83'395	129	153
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung			
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	14'451	22	16
	Batterien	pro Jahr	10'838	29	17
	Ersatzbatterien	pro Jahr	8'651	23	13
	Ladestationen	pro Jahr	1'007	2	2
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	19'613	28	12
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	89
Total	Total	pro Jahr	54'559	105	149
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung			
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	14'451	22	16
	Batterien	pro Jahr	10'838	29	17
	Ersatzbatterien	pro Jahr	13'395	36	21
	Ladestationen	pro Jahr	1'007	2	2
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	19'613	28	12
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	89
Total	Total	pro Jahr	59'304	117	156

Bahners_GB Strommix		Impact indicator	UBP, Biotic Resources	UBP, Carcinogenic substances into air	UBP, Energy resources	UBP, Global warming	UBP, Heavy metals into air	UBP, Heavy metals into soil	UBP, Heavy metals into water
			UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'531'229	4'131'239	36'507'457	5'130'178	973'176	1'293'006
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	28'634	723'932	4'786'800	253'470	64'858	66'724
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	1'748'046	51'654'933	159'100'840	10'720'272	139'607'404	1'786'550
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	18'371	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	3'307'910	56'510'104	200'413'469	16'103'921	140'645'438	3'146'281
Diesel-Hybridbus (Euro 7)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'545'899	4'221'066	37'033'151	5'396'338	1'015'732	1'340'415
	Batterien	pro Jahr	0	20'323	30'426	240'788	208'284	4'638	4'748
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	20'323	30'426	240'788	208'284	4'638	4'748
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	444'738	50'062'553	109'502'385	2'371'804	727'148	386'830
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	346'200'686	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	2'031'284	54'344'471	493'217'797	8'184'709	1'752'155	1'736'740
Brennstoffzellenbus (H2)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'501'857	4'099'942	35'623'139	5'479'466	1'007'704	1'307'743
	Batterien	pro Jahr	0	203'234	304'259	2'407'881	2'082'837	46'378	47'477
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	203'234	304'259	2'407'881	2'082'837	46'378	47'477
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	8'910	92'024	628'690	26'732	14'958	39'483
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	8'473	87'516	597'891	25'423	14'225	37'549
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	14'317	361'966	2'393'400	126'735	32'429	33'362
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	841'421	24'864'061	76'583'062	5'160'195	67'199'912	859'955
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	2'781'446	30'114'027	120'641'945	14'984'224	68'361'982	2'373'047
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'652'043	4'509'936	39'185'453	6'027'412	1'108'474	1'438'517
	Batterien	pro Jahr	0	1'788'459	2'677'480	21'189'356	18'328'966	408'123	417'802
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	516'949	773'918	6'124'722	5'297'935	117'967	120'764
	Ladestationen	pro Jahr	0	44'795	188'660	1'584'226	730'937	39'220	60'394
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	238'334	8'393'083	25'157'430	1'383'603	22'980'405	240'000
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	4'240'579	16'543'078	93'241'186	31'768'853	24'654'189	2'277'477
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	0	1'802'229	4'919'930	42'747'766	6'575'359	1'209'244	1'569'291
	Batterien	pro Jahr	0	1'951'046	2'920'888	23'115'661	19'995'235	445'226	455'784
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	1'353'077	2'025'676	16'031'029	13'866'971	308'770	316'092
	Ladestationen	pro Jahr	0	48'867	205'811	1'728'247	797'386	42'785	65'884
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	0	242'148	8'527'373	25'559'949	1'405'741	23'348'091	243'840
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	0	5'397'366	18'599'677	109'182'651	42'640'692	25'354'117	2'650'891

Bahners_GB Strommix		Impact indicator	UBP, Land use UBP	UBP, Main air pollutants and PM UBP	UBP, Mineral resources UBP	UBP, Noise UBP	UBP, Ozone layer depletion UBP	UBP, Pesticides into soil UBP	UBP, POP into water UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	307'967	8'322'256	2'135'224	230'561	21'488	25'129	173'151
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	10'313	1'126'352	28'107	15'327	4'709	2'230	20'289
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	1'288'526	22'184'075	10'384'011	929'949	121'832	88'273	269'081
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	41'357'007	0	81'000'000	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	1'606'806	72'989'690	12'547'342	82'175'837	148'029	115'632	462'522
Diesel-Hybridbus (Euro 7)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	327'333	8'529'376	4'007'850	242'405	22'844	26'042	179'366
	Batterien	pro Jahr	3'503	134'534	47'235	2'625	1'126	230	1'226
	Ersatzbatterien	pro Jahr	3'503	134'534	47'235	2'625	1'126	230	1'226
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	935'826	21'957'928	306'656	822'686	135'195	122'987	10'395'561
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	21'172'361	0	81'000'000	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	1'270'164	51'928'733	4'408'977	82'070'342	160'291	149'489	10'577'380
Brennstoffzellenbus (H2)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	324'990	7'992'798	3'336'932	237'932	23'059	23'208	178'204
	Batterien	pro Jahr	35'027	1'345'340	472'352	26'251	11'262	2'303	12'264
	Ersatzbatterien	pro Jahr	35'027	1'345'340	472'352	26'251	11'262	2'303	12'264
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	3'340	466'103	1'476'773	9'277	136'033	350	2'308
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	3'176	443'269	1'404'427	8'823	129'369	333	2'195
	Wasserstofftanks	pro Jahr	5'157	563'176	14'053	7'664	2'354	1'115	10'145
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	620'231	10'678'287	4'998'335	447'630	58'644	42'490	129'522
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	14'822'052	0	40'500'000	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	1'026'948	37'656'364	12'175'225	41'263'828	371'983	72'102	346'901
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	357'489	8'792'077	3'670'626	261'725	25'364	25'528	196'025
	Batterien	pro Jahr	308'234	11'838'992	4'156'700	231'009	99'105	20'267	107'920
	Ersatzbatterien	pro Jahr	89'094	3'422'027	1'201'482	66'773	28'646	5'858	31'194
	Ladestationen	pro Jahr	21'775	706'047	825'427	15'311	1'887	1'033	6'808
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	203'407	3'050'034	650'511	130'865	19'550	12'908	38'286
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	14'822'052	0	40'500'000	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	980'000	42'631'229	10'504'746	41'205'683	174'552	65'594	380'233
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	389'988	9'591'357	4'004'319	285'518	27'670	27'849	213'845
	Batterien	pro Jahr	336'256	12'915'264	4'534'581	252'010	108'114	22'109	117'731
	Ersatzbatterien	pro Jahr	233'198	8'956'913	3'144'795	174'773	74'979	15'333	81'648
	Ladestationen	pro Jahr	23'755	770'234	900'466	16'703	2'058	1'127	7'427
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	206'661	3'098'834	660'919	132'959	19'863	13'114	38'899
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	15'059'205	0	41'148'000	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	1'189'858	50'391'807	13'245'080	42'009'963	232'684	79'532	459'550

Bahners_GB Strommix		Impact indicator	UBP, Radioactive substances into air	UBP, Radioactive substances into water	UBP, Radioactive waste to deposit	UBP, Waste, non radioactive	UBP, Water pollutants	UBP, Water resources, evaporated	UBP, Water resources, net balance
			UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	110	253'178	4'313'915	4'915'820	774'113	113'357	0
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	6	12'813	219'419	2'856'305	570'595	8'169	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	587	1'029'687	18'724'404	7'034'852	4'017'704	308'266	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	702	1'295'678	23'257'737	14'806'977	5'362'412	429'793	0
Diesel-Hybridbus (Euro 7)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	115	263'449	4'489'399	5'064'273	811'580	116'227	0
	Batterien	pro Jahr	1	1'159	20'927	13'244	22'650	1'333	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	1	1'159	20'927	13'244	22'650	1'333	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	85	182'063	3'170'016	343'913	7'848'622	345'050	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	201	447'829	7'701'271	5'434'674	8'705'501	463'943	0
Brennstoffzellenbus (H2)									
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	113	260'612	4'441'942	5'058'443	792'496	114'204	0
	Batterien	pro Jahr	7	11'585	209'273	132'440	226'497	13'326	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	7	11'585	209'273	132'440	226'497	13'326	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	2	3'698	63'119	138'375	38'748	2'870	3
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	2	3'517	60'027	131'596	36'850	2'730	3
	Wasserstofftanks	pro Jahr	3	6'407	109'709	1'428'152	285'297	4'085	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	282	495'639	9'012'977	3'386'220	1'933'919	148'384	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	416	793'043	14'106'321	10'407'666	3'540'305	298'924	6
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	125	286'673	4'886'136	5'564'288	871'746	125'624	0
	Batterien	pro Jahr	61	101'952	1'841'603	1'165'472	1'993'174	117'268	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	18	29'469	532'310	336'876	576'121	33'896	0
	Ladestationen	pro Jahr	5	11'616	197'583	146'827	40'179	4'190	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	94	163'723	2'984'478	1'040'968	628'891	48'528	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	303	593'432	10'442'110	8'254'431	4'110'111	329'506	0
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	136	312'735	5'330'330	6'070'132	950'996	137'045	0
	Batterien	pro Jahr	67	111'220	2'009'021	1'271'424	2'174'371	127'929	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	46	77'133	1'393'284	881'750	1'507'956	88'720	0
	Ladestationen	pro Jahr	6	12'672	215'545	160'175	43'832	4'571	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	96	166'342	3'032'230	1'057'623	638'953	49'304	0
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	0	0	0
Total	Total	pro Jahr	350	680'101	11'980'410	9'441'105	5'316'108	407'569	0

Bahners_GB Strommix		Impact indicator	Life cycle CO2 kg CO2	Life cycle NOx kg NOx	Life cycle PM kg PM10
Wasserstoffverbrennungsbuss					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	30'459	47	32
	Batterien	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	4'125	14	2
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	130'482	189	85
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	3	258
Total	Total	pro Jahr	165'066	253	378
Diesel-Hybridbus (Euro 7)					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	30'937	48	33
	Batterien	pro Jahr	208	1	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	208	1	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	47'591	169	17
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	333'839	3	130
Total	Total	pro Jahr	412'784	221	180
Brennstoffzellenbus (H2)					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	29'734	46	32
	Batterien	pro Jahr	2'084	6	3
	Ersatzbatterien	pro Jahr	2'084	6	3
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	506	1	1
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	481	1	1
	Wasserstofftanks	pro Jahr	2'063	7	1
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	62'807	91	41
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	93
Total	Total	pro Jahr	99'759	157	175
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung			
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	32'707	50	35
	Batterien	pro Jahr	18'340	49	28
	Ersatzbatterien	pro Jahr	5'301	14	8
	Ladestationen	pro Jahr	1'384	3	3
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	20'560	29	12
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	93
Total	Total	pro Jahr	78'293	146	180
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung			
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	35'681	55	38
	Batterien	pro Jahr	20'008	54	31
	Ersatzbatterien	pro Jahr	13'876	37	22
	Ladestationen	pro Jahr	1'510	3	3
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	20'889	30	13
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	94
Total	Total	pro Jahr	91'963	179	201

Sensitivität Strom aus Wasserkraftwerk zum Laden und zur Wasserstoffproduktion

OV_SB_HVZ-V Wasserkraft		Impact indicator	Climate change (IPCC2021) GWP 100	Cumulative Energy demand total	Cumulative Energy demand non- renewable	Cumulative Energy demand renewable	UBP total
			kg CO2 eq	MJ	MJ	MJ	UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	26'390	389'233	353'066	36'166	52'116'190
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	4'266	79'760	77'489	2'271	9'719'147
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	27'937	12'480'956	274'830	12'195'968	197'574'538
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	471	0	0	0	104'268'275
Total	Total	pro Jahr	59'065	12'949'949	705'385	12'234'405	363'678'150
Diesel-Hybridbus (Euro 7)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	26'835	398'870	361'484	37'386	54'791'554
	Batterien	pro Jahr	286	4'748	4'219	529	910'799
	Ersatzbatterien	pro Jahr	286	4'748	4'219	529	910'799
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	81'479	4'689'267	4'669'980	19'286	162'922'627
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	271'583	0	0	0	361'817'663
Total	Total	pro Jahr	380'470	5'097'633	5'039'902	57'730	581'353'442
Brennstoffzellenbus (H2)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	25'635	385'278	348'412	36'866	52'346'411
	Batterien	pro Jahr	2'863	47'479	42'188	5'291	9'107'992
	Ersatzbatterien	pro Jahr	2'863	47'479	42'188	5'291	9'107'992
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	1'244	22'805	21'542	1'263	3'151'797
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	1'183	21'688	20'487	1'201	2'997'392
	Wasserstofftanks	pro Jahr	2'133	39'880	38'745	1'135	4'859'574
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	11'346	5'069'060	111'620	4'953'314	80'243'627
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	45'740'247
Total	Total	pro Jahr	47'267	5'633'670	625'182	5'004'362	207'555'032
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	25'635	385'278	348'412	36'866	52'346'411
	Batterien	pro Jahr	18'609	308'615	274'220	34'394	59'201'948
	Ersatzbatterien	pro Jahr	1'450	24'048	21'368	2'680	4'613'179
	Ladestationen	pro Jahr	1'710	27'047	23'732	3'315	5'047'550
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	2'753	1'934'381	20'522	1'912'264	26'875'260
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	45'740'247
Total	Total	pro Jahr	50'157	2'679'370	688'255	1'989'520	193'824'596
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	25'635	385'278	348'412	36'866	52'346'411
	Batterien	pro Jahr	18'609	308'615	274'220	34'394	59'201'948
	Ersatzbatterien	pro Jahr	5'568	92'334	82'043	10'290	17'712'514
	Ladestationen	pro Jahr	1'710	27'047	23'732	3'315	5'047'550
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	2'753	1'934'381	20'522	1'912'264	26'875'260
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	45'740'247
Total	Total	pro Jahr	54'275	2'747'656	748'931	1'997'130	206'923'930

OV_GB_Int Wasserkraft			Climate change (IPCC2021) GWP 100 kg CO2 eq	Cumulative Energy demand total MJ	Cumulative Energy demand non- renewable MJ	Cumulative Energy demand renewable MJ	UBP total UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	57'648	850'251	771'248	79'003	113'844'089
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	7'584	141'796	137'759	4'037	17'278'484
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	65'849	29'418'090	647'784	28'746'362	465'690'724
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	1'274	0	0	0	213'994'222
Total	Total	pro Jahr	132'355	30'410'137	1'556'791	28'829'402	810'807'520
Diesel-Hybridbus (Euro 7)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	58'485	869'297	787'818	81'479	119'412'577
	Batterien	pro Jahr	382	6'331	5'625	706	1'214'399
	Ersatzbatterien	pro Jahr	382	6'331	5'625	706	1'214'399
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	178'738	10'286'687	10'244'380	42'307	357'397'916
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	596'863	0	0	0	750'805'743
Total	Total	pro Jahr	834'849	11'168'645	11'043'448	125'197	1'230'045'034
Brennstoffzellenbus (H2)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	56'263	845'592	764'680	80'912	114'887'655
	Batterien	pro Jahr	3'817	63'306	56'250	7'055	12'143'989
	Ersatzbatterien	pro Jahr	3'817	63'306	56'250	7'055	12'143'989
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	1'990	36'488	34'468	2'020	5'042'876
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	1'893	34'700	32'779	1'921	4'795'827
	Wasserstofftanks	pro Jahr	3'792	70'898	68'879	2'019	8'639'242
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	27'253	12'175'417	268'102	11'897'405	192'737'823
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	87'674'570
Total	Total	pro Jahr	98'826	13'289'707	1'281'409	11'998'388	438'065'970
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	56'263	845'592	764'680	80'912	114'887'655
	Batterien	pro Jahr	30'538	506'445	450'003	56'442	97'151'915
	Ersatzbatterien	pro Jahr	18'129	300'655	267'148	33'507	57'675'029
	Ladestationen	pro Jahr	2'280	36'063	31'643	4'420	6'730'067
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	6'615	4'648'125	49'312	4'594'981	64'578'572
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	87'674'570
Total	Total	pro Jahr	113'826	6'336'881	1'562'787	4'770'262	428'697'807
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	63'296	951'291	860'266	91'026	129'248'612
	Batterien	pro Jahr	34'355	569'750	506'253	63'497	109'295'904
	Ersatzbatterien	pro Jahr	36'746	609'395	541'480	67'915	116'901'042
	Ladestationen	pro Jahr	2'565	40'571	35'598	4'973	7'571'325
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	6'657	4'677'130	49'620	4'623'653	64'981'543
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	88'221'659
Total	Total	pro Jahr	143'619	6'848'138	1'993'217	4'851'064	516'220'084

RV-M_GB_Int Wasserkraft		Impact indicator	Climate change (IPCC2021) GWP 100 kg CO2 eq	Cumulative Energy demand total MJ	Cumulative Energy demand non- renewable MJ	Cumulative Energy demand renewable MJ	UBP total UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	28'824	425'125	385'624	39'501	56'922'045
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	3'792	70'898	68'879	2'019	8'639'242
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	36'299	16'216'674	357'090	15'846'385	256'711'242
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	815	0	0	0	123'572'162
Total	Total	pro Jahr	69'730	16'712'697	811'593	15'887'905	445'844'690
Diesel-Hybridbus (Euro 7)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	29'242	434'648	393'909	40'739	59'706'288
	Batterien	pro Jahr	191	3'165	2'813	353	607'199
	Ersatzbatterien	pro Jahr	191	3'165	2'813	353	607'199
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	102'033	5'872'156	5'848'005	24'151	204'020'627
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	338'464	0	0	0	440'369'517
Total	Total	pro Jahr	470'121	6'313'135	6'247'539	65'596	705'310'832
Brennstoffzellenbus (H2)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	28'132	422'796	382'340	40'456	57'443'827
	Batterien	pro Jahr	1'909	31'653	28'125	3'528	6'071'995
	Ersatzbatterien	pro Jahr	1'909	31'653	28'125	3'528	6'071'995
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	995	18'244	17'234	1'010	2'521'438
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	946	17'350	16'390	961	2'397'913
	Wasserstofftanks	pro Jahr	1'896	35'449	34'440	1'009	4'319'621
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	16'887	7'544'142	166'121	7'371'880	119'424'372
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	54'303'984
Total	Total	pro Jahr	52'673	8'101'287	672'775	7'422'371	252'555'145
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	28'132	422'796	382'340	40'456	57'443'827
	Batterien	pro Jahr	15'269	253'222	225'001	28'221	48'575'957
	Ersatzbatterien	pro Jahr	11'900	197'357	175'362	21'995	37'859'288
	Ladestationen	pro Jahr	1'140	18'032	15'821	2'210	3'365'033
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	3'809	2'676'373	28'394	2'645'772	37'184'092
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	54'303'984
Total	Total	pro Jahr	60'250	3'567'780	826'919	2'738'654	238'732'182
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	31'648	475'646	430'133	45'513	64'624'306
	Batterien	pro Jahr	17'178	284'875	253'127	31'749	54'647'952
	Ersatzbatterien	pro Jahr	21'323	353'621	314'211	39'410	67'835'631
	Ladestationen	pro Jahr	1'283	20'285	17'799	2'486	3'785'662
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	3'824	2'687'149	28'508	2'656'426	37'333'820
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	54'522'648
Total	Total	pro Jahr	75'255	3'821'577	1'043'778	2'775'584	282'750'019

RV-B_SB_Int Wasserkraft		Impact indicator	Climate change (IPCC2021) GWP 100 kg CO2 eq	Cumulative Energy demand total MJ	Cumulative Energy demand non-renewable MJ	Cumulative Energy demand renewable MJ	UBP total UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	17'594	259'488	235'378	24'111	34'744'127
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	2'844	53'174	51'660	1'514	6'479'431
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	35'629	15'917'173	350'495	15'553'723	251'970'120
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	883	0	0	0	123'745'333
Total	Total	pro Jahr	56'949	16'229'835	637'532	15'579'347	416'939'012
Diesel-Hybridbus (Euro 7)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	17'890	265'914	240'990	24'924	36'527'703
	Batterien	pro Jahr	191	3'165	2'813	353	607'199
	Ersatzbatterien	pro Jahr	191	3'165	2'813	353	607'199
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	80'631	4'640'475	4'621'389	19'086	161'227'413
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	268'250	0	0	0	373'241'643
Total	Total	pro Jahr	367'153	4'912'719	4'868'004	44'715	572'211'157
Brennstoffzellenbus (H2)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	17'090	256'852	232'275	24'577	34'897'607
	Batterien	pro Jahr	1'909	31'653	28'125	3'528	6'071'995
	Ersatzbatterien	pro Jahr	1'909	31'653	28'125	3'528	6'071'995
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	829	15'203	14'362	842	2'101'198
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	789	14'459	13'658	801	1'998'261
	Wasserstofftanks	pro Jahr	1'422	26'587	25'830	757	3'239'716
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	18'080	8'077'121	177'858	7'892'690	127'861'480
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	54'747'756
Total	Total	pro Jahr	42'027	8'453'528	520'232	7'926'722	236'990'007
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	17'090	256'852	232'275	24'577	34'897'607
	Batterien	pro Jahr	12'406	205'743	182'814	22'930	39'467'965
	Ersatzbatterien	pro Jahr	9'903	164'229	145'926	18'303	31'504'255
	Ladestationen	pro Jahr	1'140	18'032	15'821	2'210	3'365'033
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	3'653	2'566'458	27'228	2'537'114	35'656'997
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	54'747'756
Total	Total	pro Jahr	44'192	3'211'314	604'064	2'605'134	199'639'613
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	17'090	256'852	232'275	24'577	34'897'607
	Batterien	pro Jahr	12'406	205'743	182'814	22'930	39'467'965
	Ersatzbatterien	pro Jahr	15'334	254'300	225'959	28'341	48'782'608
	Ladestationen	pro Jahr	1'140	18'032	15'821	2'210	3'365'033
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	3'653	2'566'458	27'228	2'537'114	35'656'997
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	54'747'756
Total	Total	pro Jahr	49'623	3'301'385	684'096	2'615'172	216'917'967

Bahners_GB Wasserkraft		Impact indicator	Climate change (IPCC2021) GWP 100 kg CO2 eq	Cumulative Energy demand total MJ	Cumulative Energy demand non-renewable MJ	Cumulative Energy demand renewable MJ	UBP total UBP
Wasserstoffverbrennungsbuss							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	36'030	531'407	482'030	49'377	71'152'556
	Batterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbatterien	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	4'740	88'623	86'099	2'523	10'799'052
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	37'025	16'541'259	364'237	16'163'559	261'849'458
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	930	0	0	0	122'375'378
Total	Total	pro Jahr	78'726	17'161'289	932'367	16'215'459	466'176'444
Diesel-Hybridbus (Euro 7)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	36'553	543'311	492'386	50'924	74'632'861
	Batterien	pro Jahr	239	3'957	3'516	441	758'999
	Ersatzbatterien	pro Jahr	239	3'957	3'516	441	758'999
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	105'054	6'046'041	6'021'175	24'866	210'062'045
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	348'019	0	0	0	448'373'047
Total	Total	pro Jahr	490'104	6'597'265	6'520'593	76'673	734'585'951
Brennstoffzellenbus (H2)							
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	35'165	528'495	477'925	50'570	71'804'784
	Batterien	pro Jahr	2'386	39'566	35'156	4'410	7'589'993
	Ersatzbatterien	pro Jahr	2'386	39'566	35'156	4'410	7'589'993
	Ladestationen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Brennstoffzellen	pro Jahr	1'244	22'805	21'542	1'263	3'151'797
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	1'183	21'688	20'487	1'201	2'997'392
	Wasserstofftanks	pro Jahr	2'370	44'311	43'050	1'262	5'399'526
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	17'822	7'962'122	175'325	7'780'316	126'041'027
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	55'322'052
Total	Total	pro Jahr	62'555	8'658'553	808'643	7'843'430	279'896'565
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		rasche Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	38'681	581'345	525'718	55'627	78'985'263
	Batterien	pro Jahr	20'995	348'181	309'377	38'804	66'791'941
	Ersatzbatterien	pro Jahr	6'068	100'641	89'425	11'216	19'306'018
	Ladestationen	pro Jahr	1'568	24'793	21'755	3'039	4'626'921
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	3'829	2'690'398	28'543	2'659'637	37'378'947
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	55'322'052
Total	Total	pro Jahr	71'141	3'745'357	974'817	2'768'322	262'411'142
Batterieelektrischer Bus (Depotlader)		langsame Batterieentwicklung					
Produktion und Entsorgung	Fahrzeuge	pro Jahr	42'197	634'194	573'510	60'684	86'165'741
	Batterien	pro Jahr	22'903	379'834	337'502	42'331	72'863'936
	Ersatzbatterien	pro Jahr	15'884	263'420	234'062	29'357	50'532'142
	Ladestationen	pro Jahr	1'710	27'047	23'732	3'315	5'047'550
	Brennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Ersatzbrennstoffzellen	pro Jahr	0	0	0	0	0
	Wasserstofftanks	pro Jahr	0	0	0	0	0
Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	pro Jahr	3'890	2'733'444	28'999	2'702'191	37'977'010
Betrieb	Betrieb	pro Jahr	0	0	0	0	56'207'205
Total	Total	pro Jahr	86'585	4'037'939	1'197'806	2'837'879	308'793'584

A8. LCI: Vordergrundsystem

Einsatzprofile

OV_SB_HVZ-V

Verwendeter Datensatz			Anzahl Fahrzeuge #	Anzahl Ersatz- batterien #	Masse kg	Treibstoff bedarf kWh/km	Jahres- bedarf km/a	Anz. Jahre a
Wasserstoffverbrennungsbuss			6.6	0	0	0.000	0	12
FZ_ICE_H2		Fahrzeuge	6.6	0	10415	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	6.6	0	0	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	6.6	0	0	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	6.6	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	6.6	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	6.6	0	636	0.000	0	12
Treibst_H2_CH-Mix_2030-2046	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	4.124	400000	12
H2ICE_OV_SB_HVZ-V	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	400000	12
Diesel-Hybridbus (Euro 7)			6.6	0	0	0.000	0	0
FZ_Diesel-Hybrid		Fahrzeuge	6.6	0	10506	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	6.6	0	50	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	6.6	1	50	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	6.6	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	6.6	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	6.6	0	0	0.000	0	12
Treibst_Diesel_kWh	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	2.558	400000	12
DHEV_OV_SB_HVZ-V	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	400000	12
Brennstoffzellenbus (H2)			6.6	0	0	0.000	0	0
FZ-FC_H2		Fahrzeuge	6.6	0	10235	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	6.6	0	500	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	6.6	1	500	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	6.6	0	350	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	6.6	0	333	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	6.6	0	318	0.000	0	12
Treibst_H2_CH-Mix_2030-2046	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	1.675	400000	12
FCEV_OV_SB_HVZ-V	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	400000	12
Batterieelektrischer Bus (Depotlader), rasche Batterieentwicklung			6.6	0	0	0.000	0	0
FZ_BEV_Depot		Fahrzeuge	6.6	0	10235	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	6.6	0	3250	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	6.6	0.078	3250	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	1.65	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	6.6	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	6.6	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	6.6	0	0	0.000	0	12
E_Durchschnitt_2030-2042_Mittelsp	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	1.248	400000	12
BEV_OV_SB_HVZ-V	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	400000	12
Batterieelektrischer Bus (Depotlader), langsame Batterieentwicklung			6.6	0	0	0.000	0	0
FZ_BEV_Depot		Fahrzeuge	6.6	0	10235	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	6.6	0	3250	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	6.6	0.299	3250	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	1.65	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	6.6	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	6.6	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	6.6	0	0	0.000	0	12
E_Durchschnitt_2030-2042_Mittelsp	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	1.248	400000	12
BEV_OV_SB_HVZ-V	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	400000	12

OV_GB_Int

Verwendeter Datensatz			Anzahl	Anzahl Ersatz-		Treibstoff	Jahres-	Anz.
UID			Fahrzeuge	batterien	Masse	bedarf	km	Jahre
			#	#	kg	kWh/km	km/a	a
Wasserstoffverbrennungsbuss			8.8	0	0	0.000	0	12
FZ_ICE_H2		Fahrzeuge	8.8	0	17064	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	8.8	0	0	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	8.8	0	0	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	8.8	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	8.8	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	8.8	0	848	0.000	0	12
Treibst_H2_CH-Mix_2030-2046	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	5.555	700000	12
H2ICE_OV_GB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	700000	12
Diesel-Hybridbus (Euro 7)			8.8	0	0	0.000	0	0
FZ_Diesel-Hybrid		Fahrzeuge	8.8	0	17172	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	8.8	0	50	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	8.8	1	50	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	8.8	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	8.8	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	8.8	0	0	0.000	0	12
Treibst_Diesel_kWh	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	3.207	700000	12
DHEV_OV_GB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	700000	12
Brennstoffzellenbus (H2)			8.8	0	0	0.000	0	0
FZ-FC_H2		Fahrzeuge	8.8	0	16847	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	8.8	0	500	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	8.8	1	500	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	8.8	0	420	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	8.8	0	399	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	8.8	0	424	0.000	0	12
Treibst_H2_CH-Mix_2030-2046	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	2.299	700000	12
FCEV_OV_GB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	700000	12
Batterieelektrischer Bus (Depotlader), rasche Batterieentwicklung			8.8	0	0	0.000	0	0
FZ_BEV_Depot		Fahrzeuge	8.8	0	16847	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	8.8	0	4000	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	8.8	0.594	4000	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	2.2	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	8.8	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	8.8	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	8.8	0	0	0.000	0	12
E_Durchschnitt_2030-2042_Mittelsp	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	1.714	700000	12
BEV_OV_GB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	700000	12
Batterieelektrischer Bus (Depotlader), langsame Batterieentwicklung			9.9	0	0	0.000	0	0
FZ_BEV_Depot		Fahrzeuge	9.9	0	16847	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	9.9	0	4000	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	9.9	1.070	4000	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	2.475	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	9.9	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	9.9	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	9.9	0	0	0.000	0	12
E_Durchschnitt_2030-2042_Mittelsp	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	1.714	704368	12
BEV_OV_GB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	704368	12

RV-M_GB_Int

Verwendeter Datensatz			Anzahl Fahrzeuge	Anzahl Ersatz- batterien	Masse kg	Treibstoff bedarf kWh/km	Jahres- km km/a	Anz. Jahre a
UID			#	#				
Wasserstoffverbrennungsbuss								
			4.4	0	0	0.000	0	12
FZ_ICE_H2		Fahrzeuge	4.4	0	17064	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	4.4	0	0	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	4.4	0	0	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	4.4	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	4.4	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	4.4	0	848	0.000	0	12
Treibst_H2_CH-Mix_2030-2046	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	4.764	450000	12
H2ICE_RV-M_GB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	450000	12
Diesel-Hybridbus (Euro 7)								
			4.4	0	0	0.000	0	0
FZ_Diesel-Hybrid		Fahrzeuge	4.4	0	17172	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	4.4	0	50	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	4.4	1	50	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	4.4	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	4.4	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	4.4	0	0	0.000	0	12
Treibst_Diesel_kWh	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	2.847	450000	12
DHEV_RV-M_GB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	450000	12
Brennstoffzellenbus (H2)								
			4.4	0	0	0.000	0	0
FZ_FC_H2		Fahrzeuge	4.4	0	16847	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	4.4	0	500	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	4.4	1	500	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	4.4	0	420	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	4.4	0	399	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	4.4	0	424	0.000	0	12
Treibst_H2_CH-Mix_2030-2046	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	2.216	450000	12
FCEV_RV-M_GB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	450000	12
Batterieelektrischer Bus (Depotlader), rasche Batterieentwicklung								
			4.4	0	0	0.000	0	0
FZ_BEV_Depot		Fahrzeuge	4.4	0	16847	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	4.4	0	4000	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	4.4	0.779	4000	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	1.1	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	4.4	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	4.4	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	4.4	0	0	0.000	0	12
E_Durchschnitt_2030-2042_Mittelsp	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	1.535	450000	12
BEV_RV-M_GB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	450000	12
Batterieelektrischer Bus (Depotlader), langsame Batterieentwicklung								
			4.95	0	0	0.000	0	0
FZ_BEV_Depot		Fahrzeuge	4.95	0	16847	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	4.95	0	4000	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	4.95	1.241	4000	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	1.2375	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	4.95	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	4.95	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	4.95	0	0	0.000	0	12
E_Durchschnitt_2030-2042_Mittelsp	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	1.535	451812	12
BEV_RV-M_GB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	451812	12

RV-B_SB_Int

Verwendeter Datensatz			Anzahl Fahrzeuge	Anzahl Ersatz- batterien	Masse kg	Treibstoff bedarf kWh/km	Jahres- km km/a	Anz. Jahre a
UID			#	#				
Wasserstoffverbrennungsbuss			4.4	0	0	0.000	0	12
FZ_ICE_H2		Fahrzeuge	4.4	0	10415	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	4.4	0	0	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	4.4	0	0	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	4.4	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	4.4	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	4.4	0	636	0.000	0	12
Treibst_H2_CH-Mix_2030-2046	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	4.676	450000	12
H2ICE_RV-B_SB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	450000	12
Diesel-Hybridbus (Euro 7)			4.4	0	0	0.000	0	0
FZ_Diesel-Hybrid		Fahrzeuge	4.4	0	10506	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	4.4	0	50	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	4.4	1	50	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	4.4	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	4.4	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	4.4	0	0	0.000	0	12
Treibst_Diesel_kWh	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	2.250	450000	12
DHEV_RV-B_SB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	450000	12
Brennstoffzellenbus (H2)			4.4	0	0	0.000	0	0
FZ-FC_H2		Fahrzeuge	4.4	0	10235	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	4.4	0	500	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	4.4	1	500	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	4.4	0	350	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	4.4	0	333	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	4.4	0	318	0.000	0	12
Treibst_H2_CH-Mix_2030-2046	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	2.373	450000	12
FCEV_RV-B_SB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	450000	12
Batterieelektrischer Bus (Depotlader), rasche Batterieentwicklung			4.4	0	0	0.000	0	0
FZ_BEV_Depot		Fahrzeuge	4.4	0	10235	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	4.4	0	3250	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	4.4	0.798	3250	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	1.1	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	4.4	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	4.4	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	4.4	0	0	0.000	0	12
E_Durchschnitt_2030-2042_Mittelsp	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	1.472	450000	12
BEV_RV-B_SB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	450000	12
Batterieelektrischer Bus (Depotlader), langsame Batterieentwicklung			4.4	0	0	0.000	0	0
FZ_BEV_Depot		Fahrzeuge	4.4	0	10235	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	4.4	0	3250	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	4.4	1.236	3250	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	1.1	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	4.4	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	4.4	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	4.4	0	0	0.000	0	12
E_Durchschnitt_2030-2042_Mittelsp	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	1.472	450000	12
BEV_RV-B_SB_Int	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	450000	12

Bahners_GB

Verwendeter Datensatz			Anzahl Fahrzeuge	Anzahl Ersatz- batterien	Masse kg	Treibstoff bedarf kWh/km	Jahres- km km/a	Anz. Jahre a
UID			#	#				
Wasserstoffverbrennungsbuss								
			5.5	0	0	0.000	0	12
FZ_ICE_H2		Fahrzeuge	5.5	0	17064	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	5.5	0	0	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	5.5	0	0	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	5.5	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	5.5	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	5.5	0	848	0.000	0	12
Treibst_H2_CH-Mix_2030-2046	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	4.859	450000	12
H2ICE_Bahners_GB	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	450000	12
Diesel-Hybridbus (Euro 7)								
			5.5	0	0	0.000	0	0
FZ_Diesel-Hybrid		Fahrzeuge	5.5	0	17172	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	5.5	0	50	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	5.5	1	50	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	5.5	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	5.5	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	5.5	0	0	0.000	0	12
Treibst_Diesel_kWh	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	2.932	450000	12
DHEV_Bahners_GB	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	450000	12
Brennstoffzellenbus (H2)								
			5.5	0	0	0.000	0	0
FZ-FC_H2		Fahrzeuge	5.5	0	16847	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	5.5	0	500	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	5.5	1	500	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	0	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	5.5	0	420	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	5.5	0	399	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	5.5	0	424	0.000	0	12
Treibst_H2_CH-Mix_2030-2046	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	2.339	450000	12
FCEV_Bahners_GB	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	450000	12
Batterieelektrischer Bus (Depotlader), rasche Batterieentwicklung								
			6.05	0	0	0.000	0	0
FZ_BEV_Depot		Fahrzeuge	6.05	0	16847	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	6.05	0	4000	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	6.05	0.289	4000	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	1.5125	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	6.05	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	6.05	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	6.05	0	0	0.000	0	12
E_Durchschnitt_2030-2042_Mittelsp	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	1.543	450000	12
BEV_Bahners_GB	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	450000	12
Batterieelektrischer Bus (Depotlader), langsame Batterieentwicklung								
			6.6	0	0	0.000	0	0
FZ_BEV_Depot		Fahrzeuge	6.6	0	16847	0.000	0	12
Bat_NMC		Batterien	6.6	0	4000	0.000	0	12
Bat_NMC		Ersatzbatterien	6.6	0.694	4000	0.000	0	12
Ladestat_200kW	Produktion und Entsorgung	Ladestationen	1.65	0	0	0.000	0	24
FC_generic		Brennstoffzellen	6.6	0	0	0.000	0	12
FC_generic		Ersatzbrennstoffzellen	6.6	0	0	0.000	0	12
H2-Tank		Wasserstofftanks	6.6	0	0	0.000	0	12
E_Durchschnitt_2030-2042_Mittelsp	Treibstoffbereitstellung	Treibstoff/Strom	0	0	0	1.543	457200	12
BEV_Bahners_GB	Betrieb	Betrieb	0	0	0	0.000	457200	12

Konsummix Schweiz (%)

Basis: EP2050+, ZERO Basis

	UID	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	Durchschnitt
Wind offshore	E_offshore_Wind	1.20%	1.21%	1.18%	1.21%	2.74%	2.54%	2.49%	2.43%	2.35%	2.12%	1.96%	1.60%	1.58%	1.89%
Wind (CH)	E_CH_Wind	2.99%	3.03%	3.04%	3.16%	5.63%	5.55%	5.58%	5.61%	5.65%	5.52%	5.46%	5.20%	5.34%	4.75%
Solar PV	E_CH_PV	14.30%	15.63%	16.92%	18.26%	22.08%	23.69%	24.98%	26.24%	27.50%	28.90%	30.03%	31.08%	32.03%	23.97%
Biomasse (Holz)	E_CH_Holz	0.85%	0.80%	0.72%	0.68%	1.00%	0.94%	0.85%	0.75%	0.66%	0.57%	0.54%	0.45%	0.42%	0.71%
Biogas	E_CH_Biogas	0.48%	0.51%	0.54%	0.56%	0.63%	0.64%	0.72%	0.76%	0.85%	0.86%	0.97%	0.99%	1.07%	0.74%
KVA	E_CH_KVA	0.18%	0.18%	0.18%	0.18%	0.18%	0.18%	0.17%	0.16%	0.15%	0.15%	0.15%	0.14%	0.14%	0.16%
Kleinwasserkraft	E_CH_Kleinwasserkraft	1.03%	1.07%	1.11%	1.14%	1.19%	1.24%	1.22%	1.20%	1.19%	1.19%	1.18%	1.22%	1.24%	1.17%
ARA	E_CH_ARA	0.18%	0.18%	0.18%	0.18%	0.18%	0.18%	0.17%	0.16%	0.15%	0.15%	0.15%	0.14%	0.14%	0.16%
Geothermie	E_CH_Geothermie	0.07%	0.07%	0.07%	0.07%	0.10%	0.10%	0.10%	0.27%	0.45%	0.62%	0.78%	0.96%	1.11%	0.36%
Erdgas CHP	E_CH_Erdgas_CHP	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Erdgas Kombikraftwerk	E_RER_Erdgas_Kombi	3.66%	3.61%	3.51%	3.45%	5.16%	4.90%	4.60%	4.35%	4.00%	3.44%	3.10%	2.70%	2.51%	3.77%
Kohlekraftwerk	E_RER_Kohle	0.90%	0.73%	0.53%	0.41%	0.70%	0.71%	0.59%	0.48%	0.40%	0.32%	0.36%	0.31%	0.28%	0.52%
Wasserkraft (Staudamm)	E_CH_Wasser_Stau	33.81%	33.62%	33.49%	33.03%	33.32%	32.89%	33.05%	33.03%	32.78%	32.65%	32.39%	32.58%	32.16%	32.98%
Wasserkraft (Fluss-Laufkraftwerk)	E_CH_Wasser_Lauf	25.68%	25.32%	24.93%	24.56%	25.04%	24.86%	24.37%	23.78%	23.31%	23.05%	22.62%	22.44%	21.83%	23.98%
Nuklear	E_CH_AKW	14.67%	14.03%	13.62%	13.12%	2.06%	1.60%	1.12%	0.78%	0.57%	0.46%	0.33%	0.20%	0.16%	4.82%

Zuordnung Hintergrunddaten

UoI (diese Studie)	Name	Ref./Fluss	Quelle	Kommentar
Bat_NMC	NMC	kg system	UVEK DB 2025 Stand Juni	system energy density of 149 Wh/kg, same EFA as NMC622
				Diesel at regional storage CH included processes: Transportation of product from the refinery to the end user, Operation of storage tanks and petrol stations. Emissions from evaporation and treatment of effluents. Excluding emissions from car-washing at petrol stations.
				Remark: Inventory for the distribution of petroleum product to the final consumer (household, car, power plant, etc.) including all necessary transports. Considering the imports to Switzerland and share of biogenic fuels.;
Treibst_Diesel_Kg	Diesel	kg	UVEK DB 2024	
			component masses from	
			ecovient transport dataset	
FC_generic	Brennstoffzellenproduktion und -entsorgung	kg	update	PEM Fuel Cell overall power density = 2.62 kg / kW, we assume FC power density improves over time.
FC_aux_electronics	Fuel cell auxiliary electronics	kg	UVEK DB 2024	67 kg for 185 kW Fuel cell for a bus in new ecovient dataset
FC_aux_mat	Fuel cell auxiliary material	kg	UVEK DB 2024	252 kg for 185 kW Fuel cell for a bus in new ecovient dataset
FC_stack	Fuel cell stack	kg	Berechnung Zelle 20	0.9 kg/kW
H2-Tank	Fuel cell stack (aus UVEK) für 60 kW FCS und 75kg Wasserstofftransport und -entsorgung (350 Bar)	kW (Einheit Stk. in UVEK ist falsch)	UVEK DB 2024	Fuel tank, compressed hydrogen gas, 700bar, with aluminium liner. NO Reduce by 30% as we need only 350 bar not 700 bar
E_Transf_Hoch_Mittelsp	Transformation, Hoch, Mittelspannung	kWh	UVEK DB 2024	Transformation high to medium voltage (dataset electricity medium voltage at grid, removed input electricity)
E_Netz_Mittel_Niedersp	Transformation, Mittel, Niederspannung	kWh	UVEK DB 2024	transformation medium to low voltage (dataset electricity low voltage at grid, removed input electricity)
E_Netz_Niedersp	Übertragungsnetz, Niederspannung	km	UVEK DB 2024	
E_Offshore_Wind	Wind offshore	kWh	UVEK DB 2024	Electricity, at wind power plant 2MW, offshore (DCE) U
E_CH_Wind	Wind (CH)	kWh	UVEK DB 2024	Electricity, at wind power plant 600kW (CH) U
E_CH_PV	Solar PV	kWh	UVEK DB 2024	Average of all Swiss PV datasets
E_CH_Holz	Biomasse (Holz)	kWh	UVEK DB 2024	Average of all 5 Swiss datasets with "heat and power co-generation, wood chips" in name and kWh as unit
E_CH_Biogas	Biogas	kWh	UVEK DB 2024	Electricity, at cogeneration, biogas agricultural mix, allocation energy/CH U
E_CH_KVA	KVA	kWh	UVEK DB 2024	
E_CH_Kleinwasserkraft	Kleinwasserkraft	kWh	UVEK DB 2024	"digestate sludge...."
E_CH_APA	APA	kWh	UVEK DB 2024	average of all 4 Swiss datasets with "heat and power co-generation, natural gas" in name and kWh as unit
E_CH_Geothermie	Geothermie	kWh	UVEK DB 2024	Electricity, natural gas, at combined cycle plant, best technology (RER) U
E_CH_Erdgas_CHP	Erdgas CHP	kWh	UVEK DB 2024	
E_RER_Erdgas_Kombi	Erdgas Kombikraftwerk	kWh	UVEK DB 2024	Electricity, hydropower, at reservoir power plant (CH) U - CH
E_RER_Kohle	Kohlekraftwerk	kWh	UVEK DB 2024	Electricity, hydropower, at run-of-river power plant without reservoir (CH) U - CH
E_CH_Wasser_Steu	Wasserkraft (Saudamm)	kWh	UVEK DB 2024	average of electricity production, nuclear, boiling water reactor (CH) and electricity production, nuclear, pressure water reactor (CH)
E_CH_Wasser_Lauf	Wasserkraft (Fluss-Laufkraftwerk)	kWh	UVEK DB 2024	Wenn auffindbar: Wieviel H2-Kapazität hat die Tankstelle: je kg H2 sind in der UVEK DB 1,15*10^-7 Items Tankstelle modelliert. H2-Verluste von Elektrolyse (25 bar) bis Tankstelle 700bar: 2%
E_CH_LKW	Nuklear	Stk.	UVEK DB 2024	H2-Verluste werden bei Tankstelle berücksichtigt, LCA Datensatz transport freight lorry 7,5-16 metric tons, EURO6
Tankst_H2	H2-Tankstelle	tkm	UVEK DB 2024	Strombedarf 3,2 kWh pro kg H2 für Kompression von 25 auf 700bar für Herstellung 55kWh je kg H2 bei 25 bar. Wenn vorhanden: bitte Kapazität (kg H2 pro Stunde oder so) angeben -> halber keine weitere Infos mehr vorhanden. Main dataset: Hydrogen, gaseous, 25 bar, from electrolysis, from label-certified electricity (CH) U.
Transport_H2	H2-Transport	kg H2	UVEK DB 2024	
Komprimieren_H2	H2 komprimieren 25 bar - 700 bar	kg H2	UVEK DB 2024	suspension, for lorry
Prod_H2_ohne_Strom	H2, 25 bar Elektrolyse, alles ausser direkter Strombedarf	kg	UVEK DB 2024	cabin, for lorry
			UVEK DB 2024	frame, blanks and saddle, for lorry
			UVEK DB 2024	tires and wheels, for lorry
			UVEK DB 2024	other components, for hybrid electric lorry
			UVEK DB 2024	gearbox, for lorry
			UVEK DB 2024	transmission, for lorry
			UVEK DB 2024	power electronics, for lorry
			UVEK DB 2024	retarder, for lorry
			UVEK DB 2024	exhaust system, for lorry
			UVEK DB 2024	internal combustion engine, for lorry
			UVEK DB 2024	other components, for electric lorry
			UVEK DB 2024	inverter, for electric lorry
			UVEK DB 2024	power distribution unit, for electric lorry
			UVEK DB 2024	converter, for electric lorry
			UVEK DB 2024	electric motor, for electric lorry
			UVEK DB 2024	EV charger, level 3, plugin, 200 kW (RER) U exclude battery: weight ca. 1200kg. In the inventory documentation of Mobiltool its written that this charger has a capability to fast-charge 210kWh/day or 5 trucks with a 350 kWh battery pack, 24 year lifetime
Ladestat_200kW	EV charger plugin 200kW	Stk.	UVEK DB 2024	

A9. Bericht kritische Begutachtung LCA

Externes Gutachten Ökobilanz H2-Busse

November 2025

Martina Alig und Eveline Volkart

Intep – Integrale Planung GmbH

Kontakt:

Pfingstweidstrasse 16

8005 Zürich

alig@intep.com

044 578 11 42

www.intep.com

1 Einleitung

Die Firma INFRAS führte, mit der Unterstützung des Forschungs- und Innovationsförderung-Programms ESöV vom Bundesamt für Verkehr, das Projekt Lebenszykluskosten und Umweltbilanz von Bussen mit Wasserstoffantrieb durch. Innerhalb des Projekts wurde eine Ökobilanz von Bussen mit Elektro-, Wasserstoff oder Dieselantrieb erstellt, welche verschiedene Bustypen für verschiedene Einsatzprofile vergleicht. Untersucht wurden fünf Varianten von Antriebstechnologien: Batterie-Depotlader, Batterie-Unterwegslader, Brennstoffzelle, Wasserstoff-Verbrenner und Dieselmotor in je zwei Gefässgrößen (12m und 18m (Gelenk)bus). Als Ergebnisse der Wirkungsabschätzung wurden Indikatoren für den Treibhauseffekt (GWP 100 in kg CO₂-eq), für den Primärenergiebedarf (MJ-eq nicht erneuerbar und erneuerbar) sowie die kumulierte Umweltbelastung in UBP ausgewiesen. Daneben wurden Sachbilanzergebnisse für die Emissionen von CO₂, NO_x und Partikel (PM₁₀) berechnet und dokumentiert.

Ziel des Projektes war es, fundierte Entscheidungsgrundlagen für Transportunternehmen und Besteller des öffentlichen Verkehrs zu erarbeiten, um die Antriebsoptionen für den Einsatz fossilfreier Busse besser vergleichen zu können.

Die LCA wurde basierend auf der ISO-Norm für Ökobilanzen (14'044ff) durchgeführt. Diese Norm sieht bei Studien, die unterschiedliche Systeme vergleichen und für die Öffentlichkeit bestimmt sind, zwingend eine externe Begutachtung (kritisches Review) vor. Für die Durchführung des externen Reviews hat das BAV die Firma Intep – Intergrale Planung GmbH beauftragt. Der vorliegende Bericht zeigt das Vorgehen für das Review und das Resultat daraus auf.

Hauptziele des kritischen Reviews waren:

- Überprüfung der Angemessenheit der Arbeit im Hinblick auf die ISO-Normen 14040/44
- Überprüfung der Vollständigkeit der Lebenszyklusinventare
- Überprüfung der Berechnungen (wo Einblick möglich)
- Überprüfung der Plausibilität der Resultate und Schlussfolgerungen
- Beurteilung der Angemessenheit der Sensitivitätsanalysen

2 Vorgehen

Die Ökobilanz wurde zwischen Januar und September 2025 von Infras und EcoExistence Althaus erstellt. Der definitive Schlussbericht über das ganze Projekt lag im Oktober 2025 vor. Das externe Review erfolgte auf Grundlage der ISO-Normen 14040/44 und wurde begleitend zur Studie durchgeführt. Die folgenden Punkte wurden überprüft:

- Ziel und Untersuchungsrahmen (funktionelle Einheit / Systemgrenzen)
- Sachbilanz (Datengrundlage, Mengenbilanz, Datenvalidierung, Allokation)
- Resultate (Berechnungen, Plausibilität, Sensitivitätsanalysen und Aussagen)
- Dokumentation (Vollständigkeit, Nachvollziehbarkeit, Verständlichkeit)

Die Prüfung wurde durch Martina Alig und Eveline Volkart durchgeführt. Beide Gutachterinnen sind bei intep tätig und unabhängig vom Projekt und den Ausführenden der Ökobilanz.

Der Ablauf der externen Prüfung war wie folgt:

- März 25: Kick-off und Einführung in das Projekt
- April 25: Prüfung Goal & Scope anhand Berichtsentswurf
- Mai 25: Besprechung und Feedback zu Goal & Scope sowie Aufbau Resultatkapitel
- September 25: Prüfung Resultate, Sensitivitätsanalysen und Schlussfolgerungen anhand Berichtsentswurf
- Oktober 25: Plausibilitätsprüfung Berechnungen im Rahmen eines Online-Meetings, Prüfung finale Version Bericht. Zustellung Schlussfolgerungen Review für Begleitgruppenmeeting.
- November 25: Erstellung Review-Bericht

Auftauchende Fragen wurden jeweils direkt mit den Autoren der Studie geklärt. Der vorliegende finale Reviewbericht wird als Anhang im Schlussbericht veröffentlicht.

3 Resultat der kritischen Prüfung

3.1 Ziele und Rahmenbedingungen

Die Zieldefinition, die funktionelle Einheit sowie die Systemgrenzen sind klar beschrieben und entsprechen den Anforderungen der ISO-Normen 14040/44. Die End-of-Life Phase ist gemäss dem cut-off-Ansatz nicht berücksichtigt, bzw. es wird davon ausgegangen, dass die Busse nach ihrer Nutzungsdauer rezykliert oder wiederverwendet werden (z.B. Export ins Ausland). Hierbei wird ausgeblendet, dass die EoL-Phase einen relevanten Einfluss auf die Umweltbelastung des Gesamtsystems haben könnte (z.B. durch die Wiederverwendung der Batterie beim Elektrobuss). Die deswegen geforderte Sensitivitätsanalyse zur Zweitnutzung von Batterien (Second-Life-Szenario) wurde von den Autor:innen der Studie erfolgreich integriert und adressiert hiermit die zuvor kritisierte Nicht-Berücksichtigung der End-of-Life-Phase.

Ebenso wurde eine Sensitivitätsanalyse zum Strommix (einschliesslich eines optimierten erneuerbaren Szenarios) durchgeführt, welche wichtige Erkenntnisse zur Einflussstärke dieses Parameters liefert.

3.2 Sachbilanz

Die Datenaufbereitung ist sorgfältig und systematisch erfolgt; Primär- und Sekundärdaten sind klar differenziert und nachvollziehbar dokumentiert. Die Ergänzung zusätzlicher Angaben zu Parametern und Inventaren im Anhang trägt zur guten Transparenz bei.

Ein Verbesserungspotenzial bestünde in der expliziten tabellarischen Darstellung der Datenqualität nach ISO-Kriterien (z. B. zeitliche, geografische und technologische Repräsentativität). Nicht enthalten im Bericht ist zudem eine vollständige Auflistung der verwendeten Hintergrundinventare.

3.3 Wirkungsabschätzung

Die LCIA wurde methodisch korrekt und nachvollziehbar durchgeführt. Die Ergebnisdarstellung ist durch die Überarbeitung in der finalen Version verständlicher strukturiert und wird durch ergänzende Grafiken sinnvoll unterstützt. Die hinzugefügten Sensitivitätsanalysen (Strommix, Recycling/2nd-Life-Batterie) erlauben eine robuste Einordnung der Resultate und stärken die Aussagekraft.

Die Prüfung der Berechnungen erfolgte in einem Online-Termin mittels einer Präsentation der verwendeten Excel-Dateien durch die Autoren der Studie. Dabei wurden durch die Reviewerinnen keine Unstimmigkeiten festgestellt und die Resultate wurden als plausibel beurteilt. Die sorgfältige Validierung der Rechenschritte reduziert die Fehleranfälligkeit der komplexen Excel-Struktur. Im Review fand jedoch keine vollständige Prüfung aller Rechenschritte statt.

Die Resultatdarstellung ist fachlich sehr solide, jedoch für nicht-spezialisierte Zielgruppen stellenweise anspruchsvoll.

3.4 Interpretation

Die Interpretation basiert konsistent auf den Ergebnissen der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung und begründet die Schlussfolgerungen nachvollziehbar. Die Sensitivitätsanalysen tragen zur Robustheit der Ergebnisse bei und sind methodisch gut aufgebaut. Die Studie stellt damit eine solide und belastbare Grundlage für Entscheidungen dar.

Hinsichtlich der durchgeführten Sensitivitätsanalysen ist festzuhalten, dass das Szenario unter Verwendung von Strom aus einem Laufwasserkraftwerk eine potenzielle Bestvariante darstellt und fachlich interessante Erkenntnisse liefert. Aufgrund der realitätsfernen Umsetzbarkeit dieser Variante ist es jedoch eher als theoretisch zu betrachten. Ergänzend wäre ein Szenario mit Solarstrom von besonderem Interesse gewesen, da erneuerbare Energieträger für eine glaubwürdige Verbesserung der Ökobilanz aus zusätzlichem Ausbau stammen müssten, um eine Problematik des Greenwashings zu vermeiden – wie im Kapitel 6 des Berichtes korrekt beschrieben wurde.

Zudem hätten Unsicherheiten, Schwachstellen der Datengrundlage sowie Limitationen stärker gebündelt betrachtet werden können – idealerweise in einem eigenständigen Kapitel.

3.5 Beurteilung

Der begleitende Reviewprozess fand in konstruktiver und professioneller Zusammenarbeit mit den Studienautor:innen statt. Offene Fragen wurden jederzeit sachlich und fundiert beantwortet. Die Zusammenstellung der Datengrundlagen erfolgte sorgfältig und mit hoher fachlicher Kompetenz; die Datenbasis ist ausführlich, transparent und gut nachvollziehbar dokumentiert. Die Studie ist umfassend und trotz der hohen Komplexität der Materie insgesamt gut verständlich dargestellt. Alle verwendeten Daten sind systematisch referenziert, und die Unterscheidung zwischen erhobenen Primärdaten und Sekundärdaten ist durchgehend klar erkennbar.

Die im Rahmen des Reviews eingebrachten Anmerkungen zum Bericht wurden weitgehend berücksichtigt und angemessen in die überarbeitete Version integriert. Die Darstellung der Resultate bleibt stellenweise jedoch recht komplex und setzt für das Verständnis der detaillierten Ergebnisse weiterhin ein gewisses fachliches Vorwissen in der Ökobilanzierung voraus, was die Nachvollziehbarkeit für weniger spezialisierte Leser:innen anspruchsvoll macht.

Die Verlässlichkeit der Resultate sowie die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen wurde mittels plausibler Sensitivitätsanalysen geprüft und im Fazit durch die Studienautoren übersichtlich eingeschätzt.