

Umwelt- und Gesundheitsschutz, Stadt Zürich
Tiefbauamt, Stadt Zürich
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft, Kanton Zürich

Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext Schlussbericht

Forschungsprojekt
Bern, Villigen, Zürich, 28. Juni 2020

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

Impressum

Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext

Schlussbericht

Forschungsprojekt

Bern, Villigen, Zürich, 28. Juni 2020

Umweltauswirkungen_von_Fahrzeugen_im_urbanen_Kontext_Schlussbericht.docx

Auftraggebende

Umwelt- und Gesundheitsschutz, Stadt Zürich

Tiefbauamt, Stadt Zürich

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

Projektleitung

Peter Hofmann, Umwelt- und Gesundheitsschutz, Stadt Zürich

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

Autorinnen und Autoren

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

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

Dr. Mireille Faist Emmenegger, Barbara Spiegel, Quantis

INFRAS, Sennweg 2, 3012 Bern

Tel. +41 31 370 19 19

Steuerungsgruppe

Rainer Zah, Umwelt- und Gesundheitsschutz Stadt Zürich

René Huber, Tiefbauamt Stadt Zürich

Thomas Stoiber, Baudirektion Kanton Zürich

Begleitgruppe

Amewu Mensah, Rainer Zah, Jonas Fricker, Umwelt- und Gesundheitsschutz Stadt Zürich

Ruth Furrer, Olivia Meier, René Huber, Tiefbauamt Stadt Zürich

André Wipf, Elektrizitätswerk der Stadt Zürich

Martina Blum, Stv. Energiebeauftragte Stadt Zürich

Claudia Kopp, David Sorg, Verkehrsbetriebe Zürich

Julian Richner, Sicherheitsdirektion Kanton Zürich

Lea Horowitz, Volkswirtschaftsdirektion Kanton Zürich

Jeannot Wagner, Thomas Stoiber, Baudirektion Kanton Zürich

Marco Rüdisühli, Zürcher Verkehrsverbund

Externes Review

Andrea Del Duce, Corinna Baumgartner, ZHAW

Inhalt

Impressum	2
Inhalt	3
Zusammenfassung	4
1. Ausgangslage	6
2. Vorgehen	7
2.1. Goal & Scope Definition (Ziel und Rahmen der Studie)	7
2.2. Sachbilanzanalyse	13
2.3. Wirkungsabschätzungsmethoden	14
2.4. Review	20
3. Fahrzeugmodellierung	21
3.1. Methodik	21
3.2. Wichtigste Inputdaten und Annahmen	25
4. Energieketten (Treibstoffversorgung der Fahrzeuge)	33
4.1. LCA	33
4.2. Kosten	36
5. Ergebnisse	37
5.1. Standardergebnisse für Mittelklasse Personenwagen	38
5.2. Unsicherheiten	56
5.3. Sensitivität Treibstoffversorgung	57
6. Zürich Mobilitäts-Umweltindex (ZMU)	60
6.1. Ziel und Zweck des „Zürich Mobilitäts-Umweltindex“	60
6.2. Methode	60
6.3. Normalisierung der Ergebnisse	63
6.4. Ergebnisse	67
7. Fazit	71
Glossar	73
Literatur	74
Anhang 1. Annahmen zu Mittelklasse Personenwagen: Allgemein	78
Anhang 2. Annahmen zu Mittelklasse Personenwagen: Massen (kg)	79
Anhang 3. Annahmen zu Mittelklasse Personenwagen: Kosten (CHF)	80
Anhang 4. Annahmen zu Mittelklasse Personenwagen: Unsichere Parameter	81
Anhang 5. Review-Report ZHAW	82

Zusammenfassung

Dieser Bericht enthält eine Analyse von Umweltauswirkungen verschiedener heutiger und zukünftiger Fahrzeuge aus Ökobilanzperspektive. Betrachtet wurden Personen-, Last- und Lieferwagen, Motorräder, Busse, Trams, Velos und Kommunalmaschinen, welche in der Stadt und im Kanton Zürich eingesetzt werden (könnten). Folgende Antriebsarten wurden berücksichtigt: Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, batterieelektrische und Brennstoffzellenfahrzeuge, sowie Plug-in-Hybride. Die Palette der Treibstoffe reicht von Benzin, Diesel und Erdgas über synthetische Kraftstoffe und Biomethan bis hin zu Strom und Wasserstoff. Der Zeitrahmen der Analyse erstreckt sich von heute bis zum Jahr 2050, wobei für den Blick in die Zukunft der zu erwartende technologische Fortschritt bei den Fahrzeugen wie auch mögliche Entwicklungen in der Stromversorgung anhand zweier Szenarien abgebildet wurden. Die Bewertung der Fahrzeuge erfolgt anhand verschiedener (Umwelt-)Indikatoren: Ausgewiesen werden Treibhausgasemissionen, Primärenergie-, Rohstoff- und Wasserverbrauch, Partikel- und Stickoxidemissionen und Lebenszykluskosten als «Einzelindikatoren» sowie die Ergebnisse der beiden aggregierenden etablierten Ökobilanz-Bewertungsmethoden «Ökologische Knappheit» und «ReCiPe». Ausserdem wurde eine spezifische Methode entwickelt und angewandt, welche sämtliche Einzelindikatoren (mit Ausnahme der Kosten) aggregiert, unter Berücksichtigung einer «Zürich-spezifischen» Gewichtung der Indikatoren – der so genannte «Zürich-Mobilitäts-Umweltindex» (ZMU).

Als Ergänzung zum vorliegenden Bericht, der lediglich die Annahmen und Ergebnisse zu den Mittelklassepersonenwagen im Detail dokumentiert, wurde ein Excel-Tool entwickelt, welches die Sachbilanzen des Vordergrundsystems, die Ökobilanzergebnisse und Kosten sämtlicher Fahrzeug- und Treibstoffkombinationen enthält. Alle Aussagen in diesem Bericht zu anderen Fahrzeugen basieren auf den Ergebnissen in diesen Excel-Files, in denen auch die Quellen aller Werte dokumentiert sind. Das Excel-Tool kann auch dazu verwendet werden, neue Ergebnisse mit beispielsweise zusätzlichen Szenarien der Stromversorgung und benutzerspezifischer Festlegung von Fahrzeugparametern (z.B. Masse, Emissionen, Batteriegrösse) zu berechnen.

Die Ergebnisse für Personenwagen zeigen, dass eine substantielle Reduktion der Treibhausgasemissionen nur mit einer Elektrifizierung der Fahrzeuge zu erreichen ist. Sofern die Stromversorgung grösstenteils auf CO₂-armem Strom basiert, können die Emissionen mit batterieelektrischen Fahrzeugen um bis zu zwei Drittel gesenkt werden. Brennstoffzellenautos erlauben eine etwas geringere Reduktion, da die Effizienz des Antriebs und der Wasserstoffproduktion geringer ist. Die Gesamtkosten der verschiedenen Fahrzeuge sind bereits heute recht ähnlich – eine Ausnahme stellen Brennstoffzellenautos dar, welche noch vergleichsweise teuer sind. Die Entwicklung bis 2050 hängt stark davon ab, wie sich die Energie- und Treibstoffpreise

entwickeln werden; es kann davon ausgegangen werden, dass sich die heute noch unterschiedlichen Kosten bei den Fahrzeugen angleichen werden. Die ZMU-Ergebnisse als Aggregation der Einzelindikatoren mit Zürich-spezifischer Gewichtung zeigen, dass auch die «Gesamtumweltbelastung» im urbanen Raum mit batterieelektrischen Fahrzeugen am wirkungsvollsten reduziert werden kann. Allerdings sind deren Vorteile bei einer ZMU-Bewertung nicht so stark ausgeprägt wie allein bei Treibhausgasemissionen.

Bei Bussen zeigen sich deutliche ökologische Vorteile von elektrischen Varianten gegenüber Dieselfahrzeugen. Allerdings sind die Gesamtkosten von Elektrobussen höher als bei fossilen Antrieben. Die Umweltauswirkungen von Bussen mit Brennstoffzellen-Antrieb sind stark geprägt vom erhöhten Strombedarf bei der Herstellung von Wasserstoff für den Betrieb.

Bei Lastwagen weist die Batterie in batterieelektrischen Fahrzeugen einen hohen Einfluss auf die Ökobilanzergebnisse auf: Um bei hoher Transportlast praxistaugliche Reichweiten zu ermöglichen, müssen Batterien entsprechend gross dimensioniert werden und dies macht sich in den Ökobilanzergebnissen negativ bemerkbar. Lediglich hinsichtlich Treibhausgasemissionen ermöglichen batteriebetriebene Fahrzeuge eine deutliche Reduktion der Umweltbelastung gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Brennstoffzellenfahrzeuge erweisen sich besonders bei Schwer- und Langstreckentransporten aus Gesamtumweltperspektive als ebenbürtige Alternative – beide Fahrzeugtypen profitieren hier von einer deutlichen Reduktion des Lärms. Die Gesamtkosten von elektrisch angetriebenen Lastwagen sind heute allerdings noch höher als jene von konventionellen Lastwagen.

Die Studie wurde in einer Zusammenarbeit von INFRAS, dem Paul Scherrer Institut (PSI) und Quantis im Auftrag des Umwelt- und Gesundheitsschutzes Zürich und des Tiefbauamtes der Stadt Zürich sowie des AWEL des Kantons Zürich durchgeführt. Die Begleitgruppe setzte sich aus VertreterInnen verschiedener Ämter, Betrieben und Institutionen der Stadt und des Kantons Zürich zusammen. Die Arbeit wurde einem unabhängigen Review unterzogen.

1. Ausgangslage

Heute kursieren in der wissenschaftlichen Literatur sowie in Studien von und für diverse InteressensvertreterInnen unterschiedlichste Aussagen zur ökologischen Qualität von Elektromobilität und alternativen Antrieben. Die Arbeiten sind von sehr unterschiedlicher Qualität, doch selbst bei seriös gemachten Studien können die Ergebnisse stark variieren. Gründe dafür liegen dann meist in den unterschiedlichen Festlegungen bezüglich Rahmen (Scope) und Systemgrenzen.

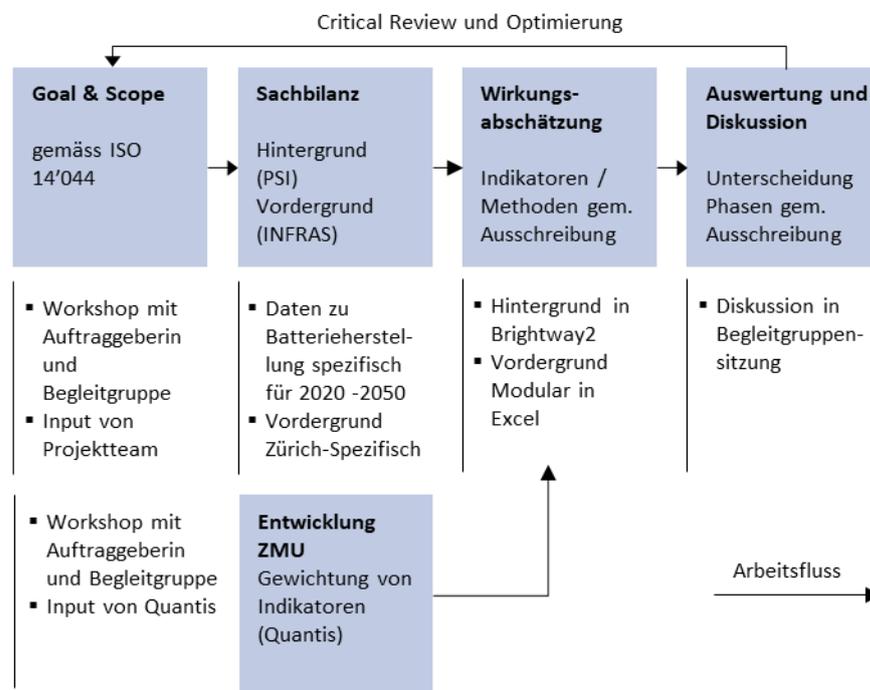
Der motorisierte Strassenverkehr muss in absehbarer Zukunft zur Erreichung der Pariser Klimaschutzziele komplett von fossilen Treibstoffen wegkommen. Weil weder nachhaltige Bio- noch synthetische Treibstoffe in ausreichenden Mengen verfügbar sein werden, um den heutigen und prognostizierten Verkehr zu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

Aus diesen Gründen hat der Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich zusammen mit dem Tiefbauamt der Stadt Zürich und dem kantonalen Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft INFRAS, PSI und Quantis beauftragt, die für politische Entscheidungen benötigten Grundlagen zu den ökologischen Auswirkungen und Kosten von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben aufzuarbeiten.

2. Vorgehen

Das prinzipielle Vorgehen in dieser Studie basiert auf den ISO-Normen für Ökobilanzen (14'04ff) und Umweltkennzeichnung (14'025). Die Arbeiten erfolgen in den Abbildung 1 veranschaulichten Schritten.

Abbildung 1 Arbeitsschritte



Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Phasen der LCA Studie und Kostenberechnung erläutert.

2.1. Goal & Scope Definition (Ziel und Rahmen der Studie)

Als erster Schritt einer Ökobilanz wird immer das Ziel und der Rahmen der Studie genau definiert und das System abgegrenzt. Dies erfolgte basierend auf der Projektausschreibung und wurde in einem Treffen und einer Feedbackrunde mit den Auftraggebenden und der Begleitgruppe im Detail abgestimmt.

Das erklärte Projektziel ist es, als Basis für ein ganzheitliches Vorgehen im Themenfeld Elektromobilität / Alternative Antriebe detaillierte, aktuelle und wissenschaftlich fundierte Aussagen zu den gesamtökologischen Auswirkungen von verschiedenen Fahrzeugen im urbanen

und speziell im (Kantons-) Zürcher Kontext - für heute und die mittelfristige Zukunft - aufzubereiten. Dies beinhaltet folgende Aspekte:

- Resultate sollen eine Basis darstellen für Kauf-/Investitionsentscheide von Kanton und Stadt Zürich.
- Die Erkenntnisse sollen auch eine Grundlage für die Festlegung politischer Strategien der Auftraggebenden darstellen.
- Als Zielpublikum werden primär EntscheidungsträgerInnen des Kantons und der Stadt Zürich adressiert.
- Der Schlussbericht soll die angewandte Methodik erklären und die Ergebnisse der Ökobilanz pro Fahrzeugkilometer darstellen; diese werden anhand von Mittelklasse Personenwagen diskutiert.
- Als Ergänzung zum Bericht soll ein Excel-Tool entwickelt werden, welches die Sachbilanzen des Vordergrundsystems, die Ökobilanzergebnisse und Kosten sämtlicher Fahrzeug- und Treibstoffkombinationen enthält. Dieses soll auch neue Ergebnisse mit beispielsweise zusätzlichen Szenarien der Stromversorgung und benutzerspezifischer Festlegung von Fahrzeugparametern (z.B. Masse, Emissionen, Batteriegrösse) berechnen können.
- Ein direkter Vergleich verschiedener Antriebsarten ist dort erwünscht, wo vergleichbare funktionale Einheiten definiert werden können.
- Externes Review erfolgt durch Andrea Del Duce und Corinna Baumgartner (ZHAW).

Nicht zuletzt sollen die Lebenszykluskosten bestimmt werden. Wir verstehen dies als «total cost of ownership», also als die gesamten Kosten, die den Nutzenden eines Fahrzeugs über die Lebensdauer des Fahrzeugs entstehen.

Die funktionelle Einheit wird pro Fahrzeugtyp und Grösse definiert mit den Parametern Fahrzeugtyp, Grösse, Herstellungsjahr, Lebensfahrleistung, Lebensdauer, und durchschnittlicher Last (Passagierzahl oder Frachtmasse). Tabelle 1 zeigt ein Beispiel für 2020 hergestellte Mittelklasse Personenwagen. Insbesondere die Annahmen zur Lebensfahrleistung sind sehr entscheidend für die Resultate. Diese Parameter sind in der beiliegenden Exceldatei «Fahrzeugdefinition.xlsx», Arbeitsblatt «Fahrzeugdefinition», zu finden. Die technischen Merkmale der Fahrzeuge mit verschiedenen Antriebstypen in «Fahrzeugdefinition» sind als Durchschnittswerte der jeweiligen Fahrzeugklasse zu verstehen und sind so definiert, dass die Fahrzeuge in derselben Klasse alle denselben Zweck, also die gleich funktionelle Einheit, erfüllen. Somit können die Ergebnisse verschiedener Antriebstypen innerhalb der Klasse (z.B. Kleinwagen, Mittelklassewagen, ...) miteinander verglichen werden. Vergleiche über verschiedene Fahrzeugtypen

und Grössen müssen mit Vorsicht gemacht werden, da die funktionellen Einheiten nicht unbedingt vergleichbar sind. Bei Vergleichen zwischen den Fahrzeugtypen ist zusätzlich die Transportleistung (Personen und Güter) zu berücksichtigen.

Tabelle 1 Beispiel funktionelle Einheiten für Mittelklasse Personenwagen mit Herstellungsjahr 2020

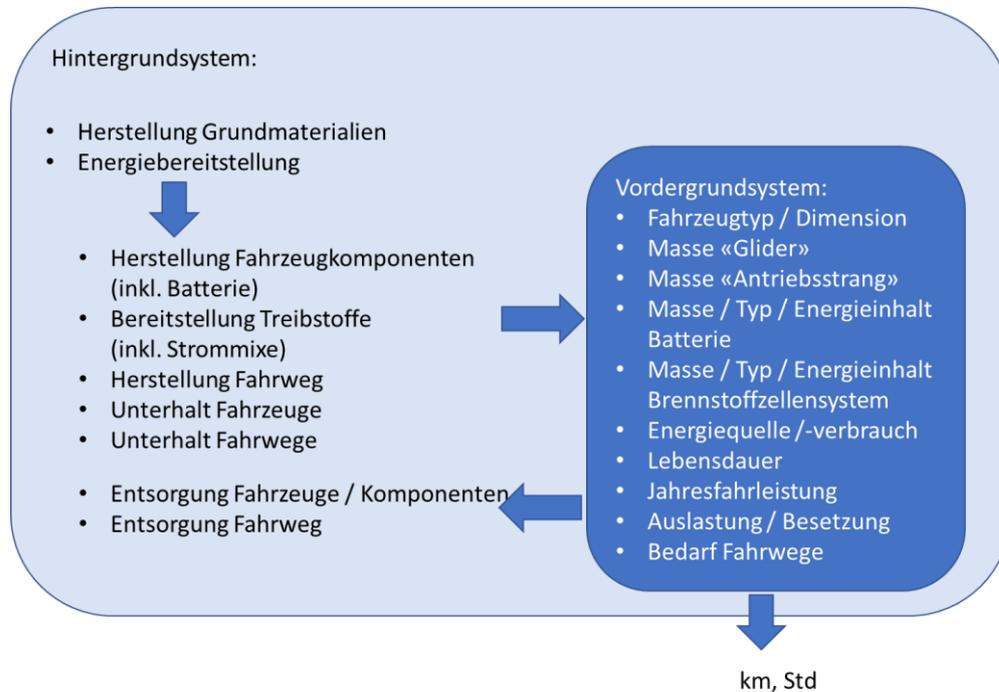
Antriebsart	Herstellungsjahr	Unsicherheit allgemein	Lebensfahrleistung (km)	Lebensdauer (Jahre)	Durchschnittliche Beladung (kg)
Benzin	2020	Basis	180000	12	125
	2020	BestCase	270000	12	125
	2020	WorstCase	90000	12	125
Plug-in hybrid Benzin	2020	Basis	180000	12	125
	2020	BestCase	270000	12	125
	2020	WorstCase	90000	12	125
Diesel	2020	Basis	180000	12	125
	2020	BestCase	270000	12	125
	2020	WorstCase	90000	12	125
Gas	2020	Basis	180000	12	125
	2020	BestCase	270000	12	125
	2020	WorstCase	90000	12	125
Elektrisch	2020	Basis	180000	12	125
	2020	BestCase	270000	12	125
	2020	WorstCase	90000	12	125
Brennstoffzelle	2020	Basis	180000	12	125
	2020	BestCase	270000	12	125
	2020	WorstCase	90000	12	125

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Der Referenzfluss der Studie ist Fahrzeugkilometer (Fzkm, km). Für Kommunalmaschinen ist er Stunden (Std). Die Studie liefert Angaben zu den Umweltauswirkungen eines Fahrzeugs pro Kilometer. Dies ist die Basis für weitere Berechnungen. Die Mengengerüste der Fahrzeuge sowie die Transportleistung (Personen und Güter) werden in der vorliegenden Studie nicht behandelt.

Abbildung 2 zeigt, wie das System abgegrenzt und in Vordergrund- und Hintergrundsystem unterteilt wird.

Abbildung 2 Systemabgrenzung und Aufteilung Hintergrund- / Vordergrundsystem



Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

Sowohl im Hintergrund- als auch im Vordergrundsystem werden praktisch sämtliche Prozesse mit potenziell relevanten Auswirkungen berücksichtigt. Fixe Abschneidekriterien kommen keine zur Anwendung. Folgende Prozesse, sind nicht berücksichtigt:

- Waschen der Fahrzeuge während der Nutzungsphase
- Ausserordentliche Betriebsfälle (z.B. unbemerkter Fehler im Abgasbehandlungssystem oder unfallbedingte Wartung oder frühzeitige Verschrottung)
- Unfälle und Störfälle entlang der gesamten Prozessketten (z.B. Ölverschmutzung aufgrund eines Tankerunglücks, unbeabsichtigt austretende Chemikalien bei der Batterieproduktion)

Die Ansprüche an die Qualität der Inventardaten wird abhängig gemacht davon, ob die Daten beim Vergleich von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebssystemen zu Unterschieden in der Umweltwirkung führen oder nicht. So ist zum Beispiel der Anspruch an die Qualität von Daten für Fahrzeugkomponenten, die in allen Personenwagen (PW) identisch sind, tiefer als der Anspruch an Datenqualität für die Batterie von Elektrofahrzeugen. Für alle Daten im Vordergrundsystem sowie für die Hintergrunddaten, die im Vergleich relevante Unterschiede bewirken können, wird eine maximale zeitliche und räumliche Qualität und grösstmögliche Vollständigkeit der Daten angestrebt.

2.1.1. Fahrzeugauswahl

Die Fahrzeuge, die analysiert werden, sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2 Fahrzeugauswahl

Fahrzeugtyp	Grösse	Antriebsart	Variante
Fahrräder, Trotti- nette	Bike	Konventionell	
		Elektrisch	< 25 km/h
		Elektrisch	< 45 km/h
		Elektrisch	Cargo
	Trottinette	Elektrisch	
Motorrad	Moped	Benzin	< 30 km/h
	Kleinmotorrad	Benzin	< 50 cm ³
		Elektrisch	< 4 kW
	Motorrad	Benzin	> 35 kW
		Elektrisch	> 35 kW
Personenwagen	Leichtmotorfahrzeuge	Elektrisch	< 550 kg, > 60 km/h
	Kleinwagen	Benzin	
		Diesel	
	Mittelklasse	Gas	
		Elektrisch	
	Oberklasse/ SUV	Brennstoffzelle	
		Plug-in-Hybrid	(nur Mittelklasse)
Tram	Tram	Elektrisch	Flexity
Bus	18m Trolley	Elektrisch	Batterietrolley
	18m	Diesel	
		Diesel Hybrid	
		Elektrisch	Depotlader
		Elektrisch	Zwischenlader
		Brennstoffzelle	
Lieferwagen, Lastwagen	3.5t	Benzin	
	7.5t	Diesel	
		Gas	
		Elektrisch	
		Brennstoffzelle	
Lastwagen	18t	Diesel	
	32t	Gas	
	Sattelzug 40t	Elektrisch	
	Kehrrechtsammelfahrzeug bis 26t	Brennstoffzelle	
Kommunalmaschine	Kehrmaschine bis 4.5t	Benzin	
		Diesel	
	Traktor 75 kW	Gas	
		Elektrisch	
		Brennstoffzelle	

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

2.1.2. Energieketten (Treibstoffversorgung der Fahrzeuge)

Die Energieketten, die berücksichtigt werden, sind in Tabelle 3 aufgelistet. Details dazu: Kapitel 4.

Tabelle 3: Energieketten zur Treibstoffversorgung der Fahrzeuge. (Details in Kapitel 4)

Energie	Herkunft	Bemerkung
Benzin	Fossil	Herstellung mit heutiger Technologie ¹
Diesel	Fossil	Herstellung mit heutiger Technologie
	PtL WWB ²	Herstellung mit heutiger Technologie,
	PtL Klima ²	Herstellung mit Stromketten von 2030, 2040, 2050
CNG	Fossil	Herstellung mit heutiger Technologie
	Biomethan	
	Mix CH	2020
	PtG WWB	Herstellung mit heutiger Technologie,
	PtG Klima	Herstellung mit Stromketten von 2030, 2040, 2050
Strom	Mix CH	2020
	Mix CH WWB	Herstellung mit heutiger Technologie,
	Mix CH Klima	Herstellung mit Stromketten von 2030, 2040, 2050
	Import (EU) ²	2020
	Import (EU) Klima	Herstellung mit heutiger Technologie,
	Import (EU) WWB	Herstellung mit Stromketten von 2030, 2040, 2050
	Mix ZH	2020
	Mix VBZ	
	Gaskombikraftwerk	Herstellung mit heutiger Technologie
	Gas WKK	
	Fotovoltaik Region ZH	
	Laufwasserkraftwerk	
	Wasserspeicherkraftwerk	
	Wind	
	Holz	
Nuklear		
Biogas		
Wasserstoff	Mix CH	2020
	Mix CH WWB	Herstellung mit heutiger Technologie,
	Mix CH Klima	Herstellung mit Stromketten von 2030, 2040, 2050
	Import (EU)	2020
	Import (EU) Klima	Herstellung mit heutiger Technologie,
	Import (EU) WWB	Herstellung mit Stromketten von 2030, 2040, 2050
	Mix ZH	2020
	Mix VBZ	
	Gaskombikraftwerk	Herstellung mit heutiger Technologie
	Gas WKK	
	Fotovoltaik Region ZH	
	Laufwasserkraftwerk	
	Wasserspeicherkraftwerk	
	Wind	
	Holz	
Nuklear		
Biogas		

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

¹ «Heutige Technologie» bedeutet Herstellung der Treibstoffe und des Stroms nach dem aktuellen Stand der Technik. Zukünftige Veränderungen in den Produktionsprozessen sind nicht abgebildet.

² WWB: Szenario «Weiter-Wie-Bisher». Klima: Szenario «Klimaschutz». ² Importstrom: dem durchschnittlichen Strommix in der EU entsprechend. Mehr dazu in Abschnitt 4.1.2.

Die S-Bahnen werden in dieser Studie nicht behandelt. Hier soll auf bestehende Ökobilanz-Tools wie das mobitool zurückgegriffen werden. Im Unterschied zu den Strassenfahrzeugen gibt es bei S-Bahnen keine grundsätzlich verschiedenen Antriebstechnologien, die man vergleichen könnte.

2.2. Sachbilanzanalyse

Der zweite Schritt umfasst das Erstellen der Sachbilanzdaten. Die Daten basieren auf ecoinvent v3.6 bzw. auf Daten des PSI/INFRAS für fahrzeugspezifische Datensätze, die nicht bzw. in nicht ausreichender Qualität³ in ecoinvent vorkommen. Details dazu sind in der Exceldatei «Fahrzeugdefinition.xlsx» im Arbeitsblatt «LCIA» zu finden.

Modulare LCA

In Anlehnung an ISO 14'025 wurde eine «Modulare LCA» erstellt. Das heisst, wir berechnen LCA-Ergebnisse anhand der konkreten Spezifikation der Fahrzeuge (Vordergrundsystem in Abbildung 2), direkt verbunden mit den Ergebnissen der Wirkungsabschätzung für die Hintergrundprozesse. Die Berechnung der kumulierten Sachbilanzen erfolgt in Brightway2 (Mutel 2017). Dieses Vorgehen hat gegenüber einer normalen Ökobilanz den Vorteil, dass für die letzten Rechnungsschritte relativ wenig Daten benötigt werden und diese Schritte darum auch effizient in Excel berechnet werden können.

Prospektive LCA

Das Vordergrundsystem (Siehe Abb. 2) wird für die Zukunft angepasst, um die Entwicklung der Fahrzeuge zu berücksichtigen (z.B. bzgl. Masse, Effizienz, Lebensdauer von wichtigen Komponenten). Im Allgemeinen wird mit dem heutigen Hintergrundsystem gerechnet. Das Erstellen und Verwenden von prospektiven Versionen der ecoinvent-Hintergrunddaten und der Treibstoffversorgungsketten wäre weit über den Rahmen dieses Projekts hinausgegangen. Ein spezieller Fokus wird jedoch auf die Entwicklung von Batterien (Kap. 3.2.3) gelegt, da die Umweltbelastungen aus deren Herstellung einen substanziellen Beitrag zum ökologischen Fussabdruck von Fahrzeugen ausmachen können (Cox et al. 2018; Cox & Bauer 2018). Für diese Aspekte werden prospektive Daten genutzt. Ausserdem wird die Zusammensetzung der zukünftigen Stromversorgung anhand von zwei möglichen Szenarien bilanziert.

³ «Nicht ausreichende Qualität» bezieht sich vor allem auf die Aktualität der Daten. So sind z.B. die Inventardaten für die Herstellung von Li-Ionen Batterien und Biomethan mehrere Jahre alt, während neuere, veröffentlichte Inventardaten von Seiten PSI verfügbar sind, welche folglich in diesem Projekt genutzt wurden.

Allokationsgrundsatz

Mit «Allokation» wird die (partielle) Zuordnung von Energieaufwand und Emissionen zu einem einzelnen Produkt eines Prozesses, welcher gleichzeitig mehrere Produkte erzeugt, bezeichnet.

Die Entsorgung von Fahrzeugen und Fahrwegen wird nach dem so genannten «cut-off-Prinzip» modelliert. Das bedeutet, dass Fahrzeuge, Komponenten oder Materialien, die nach der Entsorgung in einen Recyclingprozess gelangen, den Bilanzrahmen verlassen und dass weder der Aufwand und die Emissionen des Recyclingprozesses berücksichtigt, noch explizit Gutschriften für die zurückgewonnenen Materialien angerechnet werden. Dafür wird am Beginn des Lebenszyklus bereits ein generischer Anteil von Recyclingmaterialien in der Herstellung eingerechnet, welche frei von Umweltbelastungen sind. Aus Konsistenzgründen wird dasselbe Vorgehen für die Hintergrunddaten benutzt. Konkret bedeutet dies, dass die Entsorgung und Wiederverwertung von Fahrzeugen (und allen anderen Infrastrukturen) berücksichtigt ist, allerdings nicht im Sinne von geschlossenen Stoffströmen, sondern mittels einer Modellierung von generischen Märkten für Recyclingmaterialien.

Die Allokation von Strassenbau und Strassenwartung erfolgt nach der Methodik von ecoinvent. Strassenbau wird über verschiedene Fahrzeugtypen nach Brutto-Tonnenkilometer alloziert. Strassenwartung wird nach Kilometer alloziert.

2.3. Wirkungsabschätzungsmethoden

Tabelle 4 listet die Wirkungsabschätzungsmethoden auf, die auf Wunsch der Auftraggebenden der Studie berechnet werden.

Tabelle 4 Wirkungsabschätzungsmethoden

Aspekt	Methode	Einheit
Treibhausgase	IPCC 2013	kg CO ₂ eq
Energieverbrauch erneuerbar	Kumulierter Energieaufwand erneuerbar	MJ
Energieverbrauch nicht erneuerbar	Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar	MJ
PM ₁₀	Sachbilanzergebnis kumuliert	kg
NO _x	Sachbilanzergebnis, kumuliert	kg
Rohstoffverbrauch	ILCD 2.0 2018 midpoint	kg Sb eq
Wasserverbrauch	AWARE	m ³
Ökologischen Knappheit (UBP)	Methode der ökologischen Knappheit (2013)	Punkte
ReCiPe	ReCiPe single score	Punkte
Zürich-Mobilitäts-Umweltindex (ZMU)	Projektspezifische Entwicklung	Punkte
Raumbedarf	UGZ-intern, Basis: Methode Randelhoff	m ²
Lärm	UGZ-intern	DALY
Kosten	Total Cost of Ownership	CHF

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Treibhausgasemissionen als Mass für den Beitrag zum Klimawandel, gemessen in “kg CO₂-Äquivalent” (kg CO₂ eq). Es werden die neuesten Treibhausfaktoren des IPCC für einen Zeithorizont von 100 Jahren verwendet (Stocker, Qin et al. 2013), wie in ecoinvent v3.6 implementiert. Der **kumulierte Primärenergieverbrauch**, gemessen in Megajoule (MJ) repräsentiert den Verbrauch an Primärenergieträgern unterteilt in erneuerbar / nicht erneuerbar (Fossil, Nuklear). Die verwendeten Primärenergiefaktoren entsprechen der aktuellen Implementierung in ecoinvent v3.6.

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

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

Rohstoffverbrauch quantifiziert den Abbau von abiotischen Ressourcen nach der ILCD 2.0 Methode (Fazio et al. 2018). Rohstoffverbrauch wird in Antimon-Äquivalenten (kg Sb eq) gerechnet. Antimon (Sb) dient als Referenzsubstanz für metallische und mineralische Ressourcen. Alle verbrauchten Metalle und Minerale werden über einen spezifischen Faktor, der die jeweilige «Knappheit» repräsentieren soll, in das Metall Antimon umgerechnet. Achtung: Aufgrund der cut-off Modellierung resultieren auch für Materialien, die fast vollständig im Kreislauf geführt werden, grosse Werte für den Verbrauch von Rohstoffen, die in Realität nicht verbraucht, sondern nur für eine bestimmte Zeit genutzt werden. Diese Werte sind viel grösser als die dissipativen Verluste an den entsprechenden Rohstoffen. Der verwendete Indikator für Rohstoffverbrauch bewertet aber genau diesen dissipativen Verlust (unwiederbringlicher Materialverlust). Entsprechend wird hier ein Indikator verwendet, der nicht zur Modellierung passt und die Resultate sind entsprechend nicht valide. Bessere Alternativen, welche im Rahmen dieses Projekts umsetzbar wären, existieren nicht. Für weitere Ausführungen siehe (z.B. Althaus & Gauch 2010; Guinee 2016).

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

Die Methode der **ökologischen Knappheit** (UBP) (Frischknecht und Knöpfel, 2013) berücksichtigt ein breites Spektrum von Umweltbelastungen und fasst diese durch Vollaggregation in einer Kennzahl zusammen. Das Ergebnis sind Umweltbelastungspunkte (UBP). Im Gegensatz zu anderen Methoden basieren die UBP nicht auf potenziellen Schäden, sondern auf gesetzlichen Grenzwerten für Schadstoffe und anderen potenziell schädlichen Flüssen sowie auf den jährlichen Emissionen in der Schweiz als Bezugswerte. Somit werden Emissionen ausserhalb der Schweiz ebenfalls aufgrund der Gesetzgebung und der Umweltprobleme in der Schweiz bewertet.

Weiter auffallend ist, dass Treibhausgasemissionen ein sehr geringes Gewicht zugemessen wird. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass dieses geringe Gewicht nicht mehr die aktuellen Vorgaben der Schweizer Klimapolitik (Netto-Null im Jahr 2050) widerspiegelt. Dieses Ziel bedingt mindestens eine Halbierung des Zielwertes für THG-Emissionen gegenüber dem Wert, der in der UBP-Methodik angewendet wird. Das würde den UBP Faktor für THG-Emissionen von 0.46 UBP/g CO₂-eq auf über 2 UBP/g CO₂-eq erhöhen. Somit sollte das Gewicht von THG Emissionen um den Faktor 4 höher liegen als in UBP 2013.

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

Raumbedarf wird quantifiziert anhand von Werten vom Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ) in den Einheiten m²/Fz. Diese Werte beziehen sich nur auf die Nutzungsphase. Die Ermittlung des Raumbedarfs pro Fahrzeug stützt sich auf die Methode von Martin Randelhoff. Die Methode ist auf der Webseite «Zukunft Mobilität»⁴ ausführlich beschrieben. Der Raumbedarf errechnet sich in dieser Methode im Wesentlichen aus der Summe: Fläche Fahrzeug + doppelter Reaktionsweg + Bremsweg. Ein wichtiger Parameter für die Herleitung des Reaktionsweges und des Bremsweges ist die Anfangsgeschwindigkeit. Quellen für die angenommene Geschwindigkeit sind interne Angaben der VBZ, das HBEFA 4.1 und UGZ-Annahmen.

⁴ <https://www.zukunft-mobilitaet.net/78246/analyse/flaechenbedarf-pkw-fahrrad-bus-strassenbahn-stadtbahn-fussgaenger-metro-bremsverzoegerung-vergleich/>

Tabelle 5 angenommene Geschwindigkeit für die Berechnung des Raumbedarfs

Fahrzeugtyp	Geschwindigkeit (km/h)	Quelle
Velo	20	Annahmen UGZ
Tram	19	VBZ
Trolleybus	22	VBZ
Bus	22	VBZ
E-Trottinett	10	Annahmen UGZ
Motorrad	34	HBFA4.1
Personenwagen	26	HBFA4.1
Lieferwagen	24	HBFA4.1
Lastwagen	24	HBFA4.1
Kommunalmaschinen	20	HBFA4.1
Fussgänger	4	Annahmen UGZ

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Der Raumbedarf sagt nichts aus über die erbrachte Transportleistung. Der Raumbedarf pro Person bzw. bei Lieferwagen und Lastwagen pro Gütertransport ist nicht dargestellt. Der Parkraum ist nicht berücksichtigt. Der Grund ist, dass die Parkraumbetrachtung vertiefte Untersuchungen erfordern würde. Die Integration in den Zürich Mobilitäts-Umweltindex geschieht mittels der Normalisierungsgrösse Verkehrsleistung. Diese Grösse betrachtet die Fahrzeuge im Verkehrsfluss. Vereinfachend wurde ein Wert für jede Fahrzeugkategorie bestimmt. Eine Unterscheidung z.B. der Personenwagen in Klein-, Mittel-, Oberklasse ist nicht erfolgt.

Der Raumbedarf in m² pro Fahrzeug gibt also Auskunft über die beanspruchte Fläche während dem ein Fahrzeug einer Fahrzeugkategorie in Bewegung ist. Es gibt keinen Zusammenhang zwischen dem Raumbedarf und der durch Verkehrsinfrastruktur belegten Fläche. Eine Multiplikation der totalen Anzahl Fahrzeuge in Zürich mit diesem Raumbedarf resultiert darum nicht in der totalen Strassenfläche in Zürich! Der Raumbedarf fliesst in den Zürich Mobilitäts-Umweltindex ein und wird nicht als separater Indikator ausgewiesen.

Der **Lärm** fliesst in den Zürich Mobilitäts-Umweltindex (ZMU) via die Einheit DALY/km ein und wird nicht als separater Indikator ausgewiesen. Relevant ist nur die Nutzungsphase. Die Werte DALY/km wurden durch den Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ) aus den Parametern Lärmwert (Leq) pro Fahrzeugtyp, Fahrleistung und DALY hergeleitet.

Lärmwerte (Leq) pro Fahrzeugtyp:

Mit Hilfe des Strassenlärm-Berechnungsmodells sonROAD18⁵ wurde für jeden Fahrzeugtyp ein Schallpegel Leq in dB(A) modelliert. Dabei wurden die Werte der entsprechenden Swiss10-Kategorien⁶ und bei den ÖV-Fahrzeugen gemäss den ÖV-Fahrzeugkategorien⁷ verwendet.

Tabelle 6 verwendete Fahrzeugtypen im Strassenlärm-Berechnungsmodell sonROAD18

Fahrzeugtyp	Fahrzeugtyp in sonROAD18
Tram	UGZ-Daten für Cobra
Trolleybus	Swisstrolley+ Gelenkbus mit Batterie, 3 Achsen
Diesel-Bus	Bustyp A: Diesel-Gelenkbus, 3 Achsen
Diesel-Hybrid-Bus	Bustyp D: Hybridbus, 2-3 Achsen
Elektrobus-Bus	Swisstrolley+ Gelenkbus mit Batterie, 3 Achsen
Motorrad	Swiss10 MIV Cat. 2
Personenwagen	Swiss10 MIV Cat. 3
Lieferwagen	Swiss10 MIV Cat. 5
Lastwagen	Swiss10 MIV Cat. 8
Kommunalmaschinen	Swiss10 MIV Cat. 7

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Die Lärmwerte der Fahrzeuge hängen sehr stark von der gefahrenen Geschwindigkeit ab. Für eine Betrachtung der Lärmsituation im urbanen Raum wurden mittlere Geschwindigkeiten innerorts gewählt. Die Angaben zur mittleren Geschwindigkeit innerorts stammen aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren für Strassenfahrzeuge (HBEFA 4.1). Bei ÖV-Bussen wurden Angaben der VBZ verwendet (Geschwindigkeitsstatistik VBZ, 2020). Die durchschnittliche Geschwindigkeit des Trams (19 km/h) wurde auf 20 km/h gesetzt, da dies die untere Grenze für Berechnungen in sonROAD18 ist. Es sei darauf hingewiesen, dass die angenommenen – sehr tiefen – Geschwindigkeiten hinsichtlich der absoluten Lärmbelastungen ein falsches Bild ergeben. Für die Strassenlärmreduzierung und für Aussagen zur Lärmbelastung an bestimmten Strassenabschnitten ist eine mittlere Geschwindigkeit, in welche auch die Standzeiten vor Lichtsignalanlagen einfließen, unbrauchbar. Für den lärmspezifischen Vergleich von verschiedenen Fahrzeugtypen hingegen können die mittleren Geschwindigkeit innerorts aus dem Handbuch für Emissionsfaktoren für Strassenfahrzeuge (HBEFA 4.1) durchaus verwendet werden.

⁵ sonROAD18 ist ein Berechnungsmodell für Strassenlärm, das durch die EMPA im Auftrag des Bundesamts für Umwelt entwickelt wird. sonROAD18 ist noch nicht publiziert (weitergehende Informationen: <https://sonroad18.empa.ch>)

⁶ Fahrzeugklassierung gemäss Bericht "sonROAD18 Berechnungsmodell für Strassenlärm – Kurzfassung" (noch unpubliziert)

⁷ Fahrzeugklassierung gemäss Bericht "sonROAD18 – Weiterentwicklungen und Ergänzungen" (noch unpubliziert)

Tabelle 7 angenommene Geschwindigkeiten für die Berechnung der Lärmwerte (Leq)

Fahrzeugtyp	Geschwindigkeit (km/h)	Quelle
Tram	20	Annahme UGZ
Trolleybus	22	VBZ
Bus	22	VBZ
Motorrad	34	HBEFA 4.1
Personenwagen	26	HBEFA 4.1
Lieferwagen	24	HBEFA 4.1
Lastwagen	24	HBEFA 4.1
Kommunalmaschinen	20	HBEFA 4.1

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Fahrleistung pro Fahrzeugtyp:

Es liegt keine einheitliche Quelle für die Fahrleistungen des motorisierten Strassenverkehrs in der Stadt Zürich vor. Die jährlichen Fahrleistungen sind daher aus verschiedenen Quellen hergeleitet worden. Diese beziehen sich auf verschiedene Jahre: INFRAS-Bericht Mengengerüst Mobilität - 2000-W-Gesellschaft (bezieht sich auf 2010), BFS (bezieht sich auf 2018), ZVV (bezieht sich auf 2017).

Tabelle 8 angenommene Fahrleistungen für die Berechnung der DALY/km

Fahrzeugtyp	Fahrleistung in der Stadt Zürich (Mio. Fahrzeug-km)	Grundlagendaten für Herleitung Fahrleistung
Tram	10.8	INFRAS 2010
Trolleybus	5.1	ZVV 2017
Dieselbusse	13.3	ZVV 2017
Hybridbusse	0.5	ZVV 2017
Batteriebusse	0.05	ZVV 2017
Motorrad	40	INFRAS 2010, BFS 2018
Personenwagen	1'124	INFRAS 2010
Lieferwagen	122	INFRAS 2010
Lastwagen	25	INFRAS 2010
Kommunalmaschinen	0.7	BFS 2018

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

DALY:

Der Fachbereich Lärmschutz des UGZ hat die DALY (disability adjusted life years) infolge durch Strassenverkehrslärm verursachter Schlafstörungen berechnet. DALY ist ein Mass für den jährlichen Verlust beschwerdefreier Lebensjahre durch Krankheiten oder schädigende Umwelteinflüsse, wie z.B. Strassenverkehrslärm. Die Berechnung wurde basierend auf dem Lärmbelastungskataster 2017 der Stadt Zürich durchgeführt. Mittels einer von der WHO vorgegebenen Exposure-Response-Funktion (Basner and McGuire 2018), in welche die Anzahl der in den

Nachtstunden über einem Leq von 40 dB(A) belasteten Personen einfließt, sowie einem mittleren Disability-Weight (Faktor zur Gewichtung der Schwere der Krankheit/Behinderung, WHO 2011) von 0.07 wurden die DALY ermittelt.

Das Resultat der Untersuchung des UGZ zeigt: Im Jahr 2017 waren infolge durch Strassenverkehrslärm verursachter Schlafstörungen in der Stadt Zürich insgesamt 1133 DALY zu verzeichnen.

DALY/km:

Aus Fahrleistung und Leq eines Fahrzeugtyps kann für jeden Fahrzeugtyp der Anteil an der Schallintensität (Energieinhalt) des Gesamtpegels über den ganzen Fahrzeug-Mix berechnet werden. Unter der vereinfachten Annahme, dass die Lärmausbreitungsdämpfung bei allen Fahrzeugtypen gleich ist, kann der Anteil eines bestimmten Fahrzeugtyps an der Gesamtemission direkt auch auf die Immission und damit auch auf die DALY übertragen werden.

Die **Kosten** werden berechnet als Lebenszykluskosten («total cost of ownership»), und repräsentieren die gesamten Kosten, die den Nutzenden eines Fahrzeugs über die Lebensdauer des Fahrzeugs entstehen. Diese Kosten beinhalten Fahrzeugkauf (ohne MWST, Prämien, Abgaben), Energiekosten und Wartung. Nicht berücksichtigt sind Versicherungskosten, Parkgebühren, Autobahnvignette usw.). Am Lebensende wird das Fahrzeug entsorgt und es wird angenommen, dass die Entsorgungskosten gleich hoch sind wie der Restwert der Materialien. Das heisst, es entstehen am Lebensende keine Kosten, aber auch kein Profit.

Zürich Mobilitäts-Umweltindex (ZMU)

Neben der LCA Studie wurde in diesem Projekt auch eine neue Methode zur Wirkungsabschätzung entwickelt werden. Der „Zürich Mobilitäts-Umweltindex“ aggregiert die verschiedenen relevanten Umweltaspekte dieser Studie zu einem Index. Dabei werden die Resultate aus der LCA mit den weiteren relevanten Aspekten wie Lärm und Raumbedarf, die typischerweise in einer LCA nicht bewertet werden, in einem Index aggregiert, und entsprechend ihrer Relevanz im urbanen Umfeld gewichtet, siehe Kapitel 6.

2.4. Review

Die Studie wurde einem externen Review durch die ZHAW unterzogen. Mit dem Review wurden die Angemessenheit der Methodik und Datengrundlage, sowie der Erkenntnisse überprüft. Die Ergebnisse des Reviews sind in einem separaten Bericht dargelegt (siehe Anhang 5).

3. Fahrzeugmodellierung

3.1. Methodik

Das generelle Konzept, wie Fahrzeuge modelliert werden, ist beschrieben in der Dissertation von Cox (2018). Um verschiedene Fahrzeugtechnologien so ausgewogen wie möglich zu vergleichen, wird die "Fahrzeugbasis" für alle Antriebsarten und Treibstoffe als identisch angenommen (Althaus & Gauch 2010). Diese Fahrzeugbasis als gemeinsame Plattform wird im Folgenden in den Abbildungen als "Karosserie" bezeichnet; diese Fahrzeugbasis beinhaltet alle Komponenten, welche nicht spezifisch für eine bestimmte Technologie, Antriebsart oder einen bestimmten Treibstoff sind, beispielsweise die Karosserie, Reifen, Bestuhlung, etc. Für alle Autos werden identische Werte für Parameter wie die Masse der Fahrzeugbasis, deren Lebensdauer, Fahrzeugleistung, Transportkapazität, etc. angenommen.

Es wird angenommen, dass Fahrzeuge mit globalen Durchschnittsprozessen und Strommischen hergestellt werden. Datensätze für Wartung und Energieketten sind spezifisch für die Schweiz gültig. Siehe Excel «Fahrzeugdefinition.xlsx» Arbeitsblatt «LCIA» für mehr Informationen.

Personenwagen und Lieferwagen werden nach den neusten Daten modelliert, die in Cox et al. (2020) publiziert sind. Busse und Trolleybusse werden nach Methodik von Cox (2018) modelliert, jedoch mit angepassten Daten aus Studien von INFRAS im Auftrag diverser ÖV-Anbieter in der Schweiz (z.B. INFRAS 2019, 2020). Motorräder werden nach Cox und Mutel (2018) modelliert. Velos, Lastwagen und Kommunalmaschinen sind für diese Studie neu modelliert worden nach Methodik von Cox (2018).

Um konsistente Ergebnisse für alle geforderten Transportmittel im Zürcher Kontext zu erreichen, sind diese Daten angepasst worden. Energieverbräuche, Direktmissionen, und Fahrprofile sind Schweizer Durchschnittswerte aus dem Handbuch Emissionsfaktoren (HBEFA 4.1). Fahrzeug-Lebensdauer und -Lebensfahrleistung, Fahrzeugkosten, Energiekosten, Wartungskosten, und Strommische sind auch alle projektspezifisch angepasst worden.

Fahrzeuge werden für die Jahre 2020, 2030, 2040 und 2050 modelliert. Diese sind als Herstellungsjahre und nicht als Flottendurchschnitt zu verstehen; 2020 repräsentiert also Fahrzeuge, die 2020 hergestellt und in Betrieb gesetzt werden.

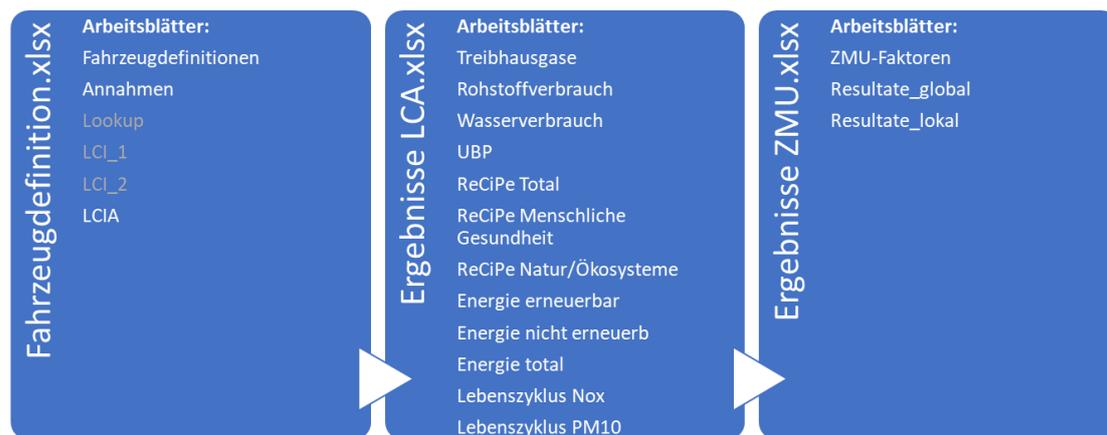
3.1.1. Excel-Tool

Wie im Kapitel 2.2 beschrieben, ist die LCA modular aufgebaut. Die Hintergrund LCA Berechnungen (siehe Abbildung 2) werden mit Brightway2⁸ durchgeführt und die Ergebnisse in Excel hinein-

⁸ Brightway2 ist eine Open-Source-Software für Lebenszyklusanalysen

kopiert. Das Vordergrund-System wird im Excel modelliert und ist Teil der Ergebnisse dieses Projekts. Das Excel-Tool besteht aus drei Teilen (da die Datenmenge zu gross ist für eine Datei). Siehe Abbildung 3

Abbildung 3 Excel-Tool Aufbau



Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

Fahrzeugdefinition.xlsx

In dieser Exceldatei wird das Vordergrundsystem der Fahrzeuge berechnet und mit dem Hintergrundsystem gekoppelt.

Im **Arbeitsblatt «Fahrzeugdefinition»** ist das eigentliche Fahrzeugmodell, oder Vordergrundsystem, enthalten. Hier werden alle Fahrzeuge definiert und berechnet, von Masse bis zu Kosten, und Emissionen. In den Spalten C bis L können die Fahrzeuge definiert werden anhand von Dropdown-Listen. Diese Spalten gelten als Index für alle Arbeitsblätter in allen drei Excel-dateien. Die anderen Spalten dieses Arbeitsblatts rechnen alle Vordergrundparametern der Fahrzeuge aus mithilfe der Annahmen, die im Arbeitsblatt «Annahmen» zu finden sind.

Im **Arbeitsblatt «Annahmen»** sind sämtliche Parameter zum Vordergrundsystem ersichtlich. Es sind dies Annahmen auf den Ebenen Fahrzeugtyp und Fahrzeuggrösse sowie Annahmen und Emissionsfaktoren auf der detailliertesten Ebene Antriebsstrang. Im Weiteren finden sich dort Annahmen betreffend Batterien, Brennstoffzellen, Treibstoffen, Plug-in-Hybriden und Energiekosten.

Im **Arbeitsblatt «LCIA»** sind die LCA Ergebnisse des Hintergrundsystems aus Brightway2. Hier sind zum Beispiel die Treibhausgasemissionen oder NO_x-Ausstösse pro kg Li Batteriezelle für verschiedene Herstellungsszenarien zu finden.

Die anderen Arbeitsblätter in Fahrzeugdefinition.xlsx sind für Zwischenschritte der Berechnung und sollen nicht angepasst werden. **Arbeitsblatt «Lookup»** hat Zuordnungstabellen drin,

die für die Berechnung notwendig sind. **Arbeitsblätter «LCI_1» und «LCI_2»** verknüpfen die Fahrzeugdaten aus dem Arbeitsblatt «Fahrzeugdefinition» mit den LCA Ergebnissen des Hintergrundsystems aus dem Arbeitsblatt «LCIA» als Vorbereitungsschritt für die eigentliche LCA Berechnung, die in der Datei «Ergebnisse LCA.xlsx» gemacht wird.

Ergebnisse LCA.xlsx

Die LCA Ergebnisse sind in der Exceldatei «Ergebnisse LCA.xlsx» zu finden. Diese werden automatisch angepasst, wenn etwas in der Exceldatei «Fahrzeugdefinition.xlsx» geändert wird. Die Arbeitsblätter sind für die verschiedenen Wirkungsabschätzungsmethoden. Diese Ergebnisse werden auch in der Exceldatei «Ergebnisse ZMU.xlsx» weiterverwendet.

Ergebnisse ZMU.xlsx

Die ZMU Ergebnisse werden in der Exceldatei «Ergebnisse ZMU.xlsx» ausgegeben, die mit den anderen Exceldateien verbunden ist. Das Arbeitsblatt «ZMU-Faktoren» beinhaltet die Gewichtungs- und -Normierungswerte der ZMU. Die Arbeitsblätter «Resultate_global» und «Resultate_lokal» beinhalten die ZMU Ergebnisse.

3.1.2. Fahrzeugwahl oder Annahmen ändern

Als Default sind alle Fahrzeuge der Studie schon im Excel-Tool vorhanden, aber nur mit Defaultwerten für die Energieketten, Batteriezellentyp- und -Herstellung⁹. Diese Werte können angepasst werden und Fahrzeuge können hinzugefügt und gelöscht werden.

Fahrzeugauswahl anpassen

Die Werte im Arbeitsblatt «Fahrzeugdefinition», Spalten C bis L, können angepasst werden, um z.B. andere Energieketten auszuwählen. Die Spalten sind mit Dropdown Menus versehen, um die Auswahl zu vereinfachen. Die Ergebnisse in allen drei Exceldateien werden automatisch angepasst.

Fahrzeugparameter ändern für ein Fahrzeug

Die Annahmen, die gebraucht werden, um die Fahrzeuge zu modellieren, können auch angepasst werden. Im Arbeitsblatt «Fahrzeugdefinition» können die Formeln direkt überschrieben werden. Zum Beispiel, falls die Lebensfahrleistung für einen Personenwagen 2020, Mittel-

⁹ Für Mittelklasse Personenwagen sind alle Energieketten und Batterieherstellungsszenarien schon enthalten. Für 2020 Mittelklasse Personenwagen mit Batterieantrieb (Durchschnittsstrom) ist schon eine einfache Sensitivitätsanalyse vorhanden (Zeilen 1377 bis 1384).

klasse, elektrisch angepasst werden sollte, kann der neue Wert direkt in die Zelle «O450» geschrieben werden. Nur dieses Fahrzeug wird angepasst, aber die Ergebnisse in allen drei Excel-dateien werden Neuberechnet.

Fahrzeugparameter ändern für alle Fahrzeuge

Es können auch die Grundannahmen im Arbeitsblatt «Annahmen» angepasst werden: Hier sind alle Fahrzeuge, die diese Werte brauchen, betroffen. Zum Beispiel, der Wert im Arbeitsblatt «Annahmen», Zelle D53 kann angepasst werden, um die Lebensfahrleistungen von allen Mittelklasse Personenwagen 2020 zu ändern.

Fahrzeuge löschen oder hinzufügen

Es können auch neue Fahrzeuge gerechnet werden, indem neue Zeilen im Arbeitsblatt «Fahrzeugdefinition» eingefügt werden. Am besten mittels Kopieren und Anpassen eines bestehenden Fahrzeugs. Falls Zellen eingefügt werden, müssen die Formeln in allen Arbeitsblättern der drei Exceldateien heruntergezogen werden. Wenn zu viele Fahrzeugen gleichzeitig gerechnet werden sollen (zu viele Zeilen), wird Excel träge. Wenn nicht alle Fahrzeugkategorien für ein Projekt benötigt werden, können ungebrauchte Fahrzeuge gelöscht werden, um Excel zu entlasten.

3.1.3. Unsicherheiten

Das Modell bildet grundsätzlich durchschnittliche Fahrzeuge ab. Normale Schwankungsbereiche sind für die wichtigsten Annahmen auch berücksichtigt:

- Lebensfahrleistung
- Karosseriekosten
- Brennstoffzellenkosten
- Brennstoffzellenlebensdauer
- Batterieenergiedichte
- Batteriekosten
- Batterielebensdauer
- Energieverbrauch
- Energiekosten
- Wartungskosten
- Amortisations-Zinssatz

Die Annahmen für diese Parameter sind im Arbeitsblatt «Annahmen» für drei Fälle vorhanden: Basis, BestCase, und WorstCase. Die Variante Basis ist der Standardwert und soll benutzt werden, wenn keine besseren Informationen vorhanden sind. BestCase und WorstCase bilden realistisch geschätzte beste bzw. schlechteste Fällen für jeden Parameter. Allerdings geben BestCase und WorstCase keine Informationen zu Wahrscheinlichkeiten oder Verteilungen der Ergebnisse. Siehe Cox et al. 2020 für eine detailliertere Unsicherheitsanalyse für Personenwagen. Per Default wird jedes Fahrzeug im Excel-Tool dreimal gerechnet. Einmal mit Durchschnittswerten für alle Parameter, und je einmal mit den besten (BestCase) bzw. schlimmsten (WorstCase) wahrscheinlichen Werten für die 11 Parameter, die mit Unsicherheitswerten versehen sind.

Die Unsicherheitsparameter können im Arbeitsblatt «Fahrzeugdefinition» ausgewählt werden. Spalte G: «Unsicherheit Allgemein» setzt die Grundannahme zur Unsicherheit. Falls die Unsicherheiten zu den verschiedenen Parametern separat analysiert werden sollen, können die Werte auch einzeln spezifiziert werden, indem die Formeln überschrieben werden. Zum Beispiel kann der Lebensfahrleistungs-Unsicherheitsparameter in Spalte N: «Lebensfahrleistung Unsicherheit» auf WorstCase gesetzt werden. Als Beispiel ist eine Unsicherheitsanalyse für elektrische Mittelklasse Personenwagen 2020 schon im Blatt «Fahrzeugdefinition» vorhanden (Reihen 1389bis 1396). Hier werden die unsicheren Parameter einzeln auf BestCase und WorstCase gesetzt, um deren Einfluss auf die Ergebnisse zu sehen. (Siehe Abbildung 18).

Die Wahl, welche Parameter mit Unsicherheiten berücksichtigt werden, ist nach Erkenntnissen von Cox et al. (2018) und Cox et al. (2020) getroffen worden. In diesen beiden Studien werden LCA Modelle erstellt, die alle Fahrzeugparameter mit Unsicherheiten definieren. Globale Sensitivitätsanalysen werden genutzt, um die Parameter zu finden, deren Unsicherheiten am wichtigsten sind für die LCA und Kosten von Personenwagen. Für mehr Informationen zu Wahrscheinlichkeiten und Verteilungen der Ergebnisse verweisen wir auf diese Studien, da solche Analysen den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden.

3.2. Wichtigste Inputdaten und Annahmen

Das Arbeitsblatt «Annahmen» in der Exceldatei «Fahrzeugdefinition.xlsx» beinhaltet alle Annahmen, die gebraucht werden, um die Fahrzeuge zu definieren. Die Quellen für die Annahmen sind im gleichen Arbeitsblatt zu finden. In diesem Kapitel beschränken wir uns auf die wichtigsten Annahmen, und jene, die nicht selbsterklärend sind.

Anhänge 1-4 in diesem Bericht zeigen die wichtigsten Annahmen für 2020 und 2050 Mittelklasse Personenwagen, die benötigt werden, um die Ergebnisse für Mittelklasse Personenwagen in diesen Bericht nachzuvollziehen.

3.2.1. Brennstoffzellen

Die Brennstoffzellenfahrzeuge sind in dieser Studie mit einer „Polymer Electrolyte Membrane“ (PEM) Brennstoffzelle ausgerüstet; diese wird in einer Hybridkonfiguration mit einer Leistungsbatterie kombiniert, um Leistungsspitzen abzudecken. Die Brennstoffzelle ist so dimensioniert, dass sie lediglich 75% der Maximalleistung des Fahrzeugs leisten muss (Cox 2019). Z.B. hat ein Mittelklasse Personenwagen in dieser Studie eine Brennstoffzelle mit einer Maximalleistung von 90 kW. Der Antriebsstrang ist für 120 kW ausgelegt.

Brennstoffzellen haben drei Hauptkomponenten: Der "Stack" ist die eigentliche Brennstoffzelle. «Balance of Plant» (BOP) beinhaltet alles, was benötigt wird, um den Stack am Laufen zu halten. Das «Essential BOP» beinhaltet mechanische Teile und das «Ancillary BOP» beinhaltet die elektronischen Teile.

Die hier verwendeten Inventardaten für die Brennstoffzelle entsprechen jenen, die von (Simons and Bauer 2015) für 2020 erstellt wurden. Diese Brennstoffzelle hat eine flächenbezogene Leistungsdichte von 800 mW/cm², einen Platingehalt von 0.125 mg/cm² und ein Gewicht von 0.51 kg/kW, was Brennstoffzellen in heute erhältlichen Brennstoffzellenautos entspricht (Cox and Bauer 2019). Die Unterschiede zwischen Fahrzeugtypen und zukünftiger Technologieentwicklung werden berücksichtigt, indem die Inventardaten pro Kilogramm bzw. pro Fläche konstant gehalten und entsprechend der angenommenen Leistungsdichte skaliert werden (Cox 2019). Siehe Tabelle 9. Brennstoffzellen in grösseren Fahrzeugen wie Bussen und Lastwagen sind schwerer für die gleiche Leistung, weil sie länger leben müssen. Somit haben diese Brennstoffzellen auch grössere Umweltauswirkungen pro kW als die von Personenwagen.

Tabelle 9 Brennstoffzellen Leistungsdichten

kg/kW Brennstoffzelle Stack	2020	2030	2040	2050
Velo	N/A	N/A	N/A	N/A
Tram	N/A	N/A	N/A	N/A
Trolleybus	N/A	N/A	N/A	N/A
Bus	0.91	0.86	0.89	0.82
Motorrad	N/A	N/A	N/A	N/A
Personenwagen	0.45	0.43	0.44	0.41
Lieferwagen	0.68	0.64	0.67	0.61
Lastwagen	0.91	0.86	0.89	0.82
Kommunalmaschine	0.91	0.86	0.89	0.82

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Es gibt noch wenig Daten zur Lebensdauer von Brennstoffzellen in verschiedenen Fahrzeugen. Wir nehmen an, Brennstoffzellen in Personenwagen und Lieferwagen müssen nicht ersetzt werden (Cox and Bauer 2019). Weiter nehmen wir an, dass alle anderen Fahrzeugtypen eine

Ersatz-Brennstoffzelle nach der halben Lebensdauer benötigen werden. Als WorstCase-Szenario im Modell werden alle Fahrzeugtypen mit einer Ersatz-Brennstoffzelle gerechnet. Im Best-Case-Szenario rechnen wir mit keinen Ersatz-Brennstoffzellen. Traktoren sind ein Spezialfall wegen ihrer sehr langen Lebensdauer bei geringer Fahrleistung. Für Traktoren im Jahr 2020 rechnen wir mit zwei Ersatz-Brennstoffzellen, 2030 und 2040 mit eineinhalb und 2050 mit einer.

Brennstoffzellenkosten sind in Tabelle 10 zu finden (Cox et al. 2020). Diese Kosten gelten für Personenwagen. Brennstoffzellen für andere Fahrzeugtypen werden ausgehend von diesen Daten skaliert nach den Angaben in Tabelle 11. Dieser Skaleneffekt resultiert erstens aus der niedrigen Stückzahl an produzierten Fahrzeugen und zweitens aus den niedrigeren Leistungsdichten in grösseren Fahrzeugen. Die Skaleneffekte für Brennstoffzellenkosten für andere Fahrzeugtypen sind kalibriert mit Kostendaten von Brennstoffzellenbussen (INFRAS 2019, 2020). Wir nehmen an, diese Skaleneffekte werden für andere Fahrzeugtypen ähnlich sein.

Tabelle 10 Brennstoffzellenkosten

CHF/kW	2020	2030	2040	2050
Basis	220	154	84	67
BestCase	176	123	67	54
WorstCase	264	185	101	81

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Tabelle 11 Brennstoffzellenkosten Skaleneffekt

	2020	2030	2040	2050
Velo	N/A	N/A	N/A	N/A
Tram	N/A	N/A	N/A	N/A
Trolleybus	N/A	N/A	N/A	N/A
Bus	12	5	2	1
Motorrad	N/A	N/A	N/A	N/A
Personenwagen	1	1	1	1
Lieferwagen	2	1.3	1.15	1
Lastwagen	12	5	2	1
Kommunalmaschine	12	5	2	1

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

3.2.2. Wasserstofftanks

Wasserstoff wird an Bord der Brennstoffzellenfahrzeuge bei einem Druck von 350 bis 700 bar gespeichert, und zwar in Tanks aus Aluminium, Karbonfasern und rostfreiem Stahl mit einer Massenzusammensetzung von 20% Aluminium, 25% Stahl und 55% Karbonfasern (Cox and Bauer 2019). Kostendaten und Massen(-anteile) von Wasserstofftanks stammen aus Cox et al.

(2020), wo wir die relevante Literatur ausgewertet haben. Die Werte sind in Tabelle 12 zu finden. Zum Einordnen der Werte: Der Default Mittelklasse-Brennstoffzellenpersonenwagen hat einen Wasserstoffspeicher von 5 kg (H₂).

Tabelle 12 Wasserstofftank: Masse und Kosten

		2020	2030	2040	2050
Tank Masse (kg Tank/kg H ₂)		19.5	18.1	16.3	14.7
Tank Kosten (CHF/kg H ₂)	Basis	1120	784	630	504
	BestCase	896	627	504	403
	WorstCase	1344	941	756	605

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

3.2.3. Batterien

Der wichtigste Bestandteil von Batteriefahrzeugen ist die Lithium-Ionen-Batterie, die als Energiespeicher dient. Diese Batterie bestimmt die Reichweite und ist für einen substantiellen Teil der Fahrzeugkosten und Umweltbelastungen aus der Fahrzeugproduktion verantwortlich (Hirschberg et al. 2016). Hier wird angenommen, dass Batterien in Zukunft aus technologischer Sicht ähnlich wie heute aufgebaut sein werden. Allerdings wird sich die Energiedichte merklich erhöhen, und die Kosten werden sinken.

Für 2020 sind Batterien mit drei verschiedenen Elektrodenkombinationen (Anode/Kathode) modelliert: Grafit/Nickel-Mangan-Kobalt (N_{1/3}M_{1/3}C_{1/3}) (NMC), Grafit/Nickel-Kobalt-Aluminium (NCA), und Grafit-Lithium-Eisen-Phosphat (LFP). NMC und NCA sind sehr ähnlich, LFP ist etwas billiger und schwerer, hat aber eine längere Lebensdauer. Siehe Tabelle 13 und Tabelle 14. NMC-Batterien werden als Default im Fahrzeugmodell für alle Fahrzeuge verwendet. Falls ein Fahrzeug mit LFP-Batterien abgebildet werden soll, sollte die Speicherkapazität manuell in Spalte AM im Arbeitsblatt «Fahrzeugdefinition» reduziert werden, damit die Batteriemasse realistisch bleibt. Als Beispiel dafür, wie diese im Excel-Tool abzubilden sind, haben wir einen elektrischen Depotlader-Bus mit LFP Batterien für 2020 abgebildet als Defaultfahrzeug. Da die Chemie von zukünftigen Lithiumbatterien unsicher ist, modellieren wir nur eine generische Lithium-Ionen-Batterie ab 2030. Die Umweltauswirkungen pro kg Zelle haben wir von der NMC-Batterie übernommen, wobei eine Steigerung der Energiedichte und eine Reduktion des Herstellungsenergiebedarfs nach Cox et al. (2020) berücksichtigt werden.

Die Annahmen zu Batterie Energiedichte sind in Tabelle 13 definiert. Diese Werte haben wir von Cox et al. (2020) genommen, basierend auf aktueller Literatur.

Tabelle 13 Batterie Energiedichte

Wh/kg Zelle		2020	2030	2040	2050
NMC	Basis	200			
LFP	Basis	100			
NCA	Basis	200			
LI Generisch	Basis		300	400	450
NMC	BestCase	220			
LFP	BestCase	110			
NCA	BestCase	220			
LI Generisch	BestCase		330	450	500
NMC	WorstCase	180			
LFP	WorstCase	90			
NCA	WorstCase	180			
LI Generisch	WorstCase		250	300	350

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Die Annahmen zu Batteriekosten sind in Tabelle 14 definiert. Diese Werte basieren auf Cox et al. (2020) und Tsiropoulos (2018). Diese Kosten gelten für die ganze Batterie und repräsentieren die Kosten, die Fahrzeugbesitzende bezahlen. Sie sind deutlich höher als die Herstellungskosten, die häufig zitiert werden, da sie auch Marge, Distributionskosten, Zölle, Steuern, usw. beinhalten (Logan, 2019).

Tabelle 14 Batterie Kosten von Personenwagen

CHF /kWh Batterie		2020	2030	2040	2050
NMC	Basis	250			
LFP	Basis	200			
NCA	Basis	250			
LI Generisch	Basis		168	112	84
NMC	BestCase	185			
LFP	BestCase	180			
NCA	BestCase	185			
LI Generisch	BestCase		126	84	63
NMC	WorstCase	300			
LFP	WorstCase	220			
NCA	WorstCase	300			
LI Generisch	WorstCase		202	134	101

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Die Batteriekosten in Tabelle 14 gelten für Personenwagen. Fahrzeuge, die nicht die gleichen Batterien wie Personenwagen verwenden können, profitieren auch nicht von den grossen Mengen an Batterien, die produziert werden. Deshalb haben wir einen Skalenfaktor im Modell eingebaut, der diesen Effekt nachbildet. Die Skalenkoeffizienten sind in Tabelle 15 zu finden.

Tabelle 15 Batteriekosten Skaleneffekt (Multiplikator gegenüber Personenwagen)

	2020	2030	2040	2050
Velo	3	2	1.5	1.2
Tram				
Trolleybus	5	4	3	3
Bus	3	2	1.5	1.2
Motorrad	2	1.5	1.2	1
Personenwagen	1	1	1	1
Lieferwagen	1.3	1.1	1	1
Lastwagen	3.5	2.25	1.5	1.2
Kommunalmaschine	5	4	3	3

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Wir nehmen an, dass Batterien in Personenwagen, Lieferwagen und Motorrädern im Normalfall während der Lebensdauer nicht ersetzt werden. Tabelle 16 zeigt die Ersatzbatterieannahmen für alle Fahrzeugtypen im Basis-Unsicherheitsszenario. Im BestCase werden keine Ersatzbatterien und in WorstCase eine Ersatzbatterie verrechnet für alle Fahrzeugtypen ausser Traktoren, denen wegen ihrer sehr langen Lebensdauer 3 Ersatzbatterien im Jahr 2020 und danach 2 Ersatzbatterien angerechnet werden im WorstCase Szenario.

Tabelle 16 Anzahl Ersatzbatterien während der Lebensdauer der Fahrzeuge im Basis-Szenario

	2020	2030	2040	2050
Velo	1.00	0.50	0.25	0.00
Trottinett	0.00	0.00	0.00	0.00
Tram				
Trolleybus	1.00	1.00	1.00	1.00
Bus	1.00	1.00	1.00	1.00
Motorrad	0.00	0.00	0.00	0.00
Personenwagen	0.00	0.00	0.00	0.00
Lieferwagen	0.00	0.00	0.00	0.00
Lastwagen	1.00	1.00	1.00	1.00
Kehrmaschine	1.00	1.00	1.00	1.00
Traktor	2.00	2.00	1.50	1.00

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Tabelle 17 zeigt die Massenanteile der «Balance of Plant (BOP)» der Batterien. Motorräder und Velos haben eine sehr einfachen BOP, die viel leichter ist, als bei grösseren Fahrzeugen. Diese Annahmen basieren auf Cox (2019).

Tabelle 17 Batterie BOP Massenanteil

	2020	2030	2040	2050
Velo	20%	20%	20%	20%
Tram				
Trolleybus	40%	38%	36%	35%
Bus	40%	38%	36%	35%
Motorrad	15%	15%	15%	15%
Personenwagen	40%	38%	36%	35%
Lieferwagen	40%	38%	36%	35%
Lastwagen	40%	38%	36%	35%
Kommunalmaschine	40%	38%	36%	35%

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Die Inventardaten der Batterien basieren zum grössten Teil auf aktuellen Industriedaten nach (Ellingsen et al. 2014 und Dai et al 2019), wie verwendet in (Sacchi et al 2020). Für den für die Ökobilanz wichtigen Faktor «Energieverbrauch bei der Zellproduktion» wird angenommen, dass dieser von heute 8 kWh/kg Batteriezelle auf 5 kWh/kg Batteriezelle im Jahr 2050 abnehmen wird. Es wird mit einer Aufteilung Strom vs. Wärme von je 50% gerechnet. Die Materialzusammensetzung der Batterien und ihrer Zellen wird für 2030/40/50 nicht verändert; dank steigender Energiedichte wird allerdings pro kg Batterie(zelle) mehr Strom gespeichert. Für den Ort der Batterieproduktion und den dadurch beeinflussten Strommix, welcher in Herstellungsprozessen verwendet wird, werden Ergebnisse für unterschiedliche Szenarien berechnet: Einerseits für einen globalen bzw. europäischen Batteriemarkt und entsprechender Produktion (mit globalen bzw. europäischen Strommischen), andererseits für ein business-as-usual und ein Klimaschutzszenario, welche sich in den Anteilen fossiler und erneuerbarer Stromproduktion und folglich in der CO₂-Intensität unterscheiden.

3.2.4. Energieverbrauch und Emissionen

Der Energieverbrauch während der Nutzungsphase und die direkten Emissionen der Fahrzeuge stammen aus dem HBEFA 4.1, gerechnet mit dem durchschnittlichen Schweizer Fahrprofil. HBEFA Werte basieren auf kalibrierten Messwerten und sollen somit «Real-World» Werte repräsentieren, die höher sind als Herstellerangaben.

Der Energieverbrauch für die verschiedenen elektrischen Velos basiert auf harmonisierten Herstellerangaben für Batteriegrössen und Reichweiten. Der Energieverbrauch für das Flexity Tram entspricht dem eines ähnlich aufgebauten Flexity Trams in Valencia.

Da HBEFA bei Personenwagen keine Grössenklassen unterscheidet, werden die Treibstoffverbräuche für grössere und kleinere Fahrzeuge unter Berücksichtigung von Masse, Luft- und Rollwiderstand skaliert (Cox et al 2020) sowie unter Berücksichtigung der Schweizer Fahrzeugflotte.

Für die Berechnung der spezifischen Treibstoffverbräuche in Zukunft werden die Entwicklungen der Fahrzeugeffizienz aus den aktuellen Arbeiten von INFRAS zu den Energieperspektiven des BFE übernommen.

Die Emissionen für Personenwagen 2020 werden nach dem 2020 Mix von Euro 6d (20%) und Euro 6d temp (80%) bei den Neuzulassungen gerechnet. Ab 2030 wird 100% Euro 6d angenommen (so wie im HBEFA 4.1).

Ladeverluste für Batteriefahrzeuge sind nach HBEFA 4.1 im Energieverbrauch der Nutzungsphase inbegriffen und betragen 15%.

Energieverbräuche von Mittelklasse Personenwagen sind in Kapitel 5.1.2 und Anhang 1 zu finden.

3.2.5. Abrieb und Aufwirbelung von Partikeln

Partikelemissionen durch Abrieb von Bremsen, Pneu und Strassen sind zwar in HEBFA 4.1 vorhanden, sind aber sehr aggregiert. Stattdessen nehmen wir die Werte direkt von dem EEA EMEP Guidebook 2019. Die Bremsabriebsemissionen für Fahrzeuge mit Elektroantrieb haben wir halbiert, weil bremsen möglichst über den Elektromotor stattfinden soll (Althaus und Gauch 2010, Cox 2018).

4. Energieketten (Treibstoffversorgung¹⁰ der Fahrzeuge)

4.1. LCA

4.1.1. Fossile Treibstoffe: Benzin, Diesel, Erdgas

Die verwendeten LCA-Ergebnisse fossiler Treibstoffe – also Benzin, Diesel und Erdgas («Compressed Natural Gas», CNG) – stammen aus ecoinvent v3.6 und werden für alle Bilanzierungsjahre 2020-2050 in identischer Form genutzt. Allfällige Veränderungen in der Art der Ressourcengewinnung und der Zusammensetzung des Treibstoffmixes (d.h., aus welchen Ländern wird importiert) sind somit nicht abgebildet.

4.1.2. Strom

Für die Stromversorgung im Jahr 2020 wird mit dem durchschnittlichen Schweizer Versorgungsmix nach ecoinvent v3.6¹¹ gerechnet. Dieser berücksichtigt sämtliche Stromimporte innerhalb eines Jahres. Der Versorgungsmix ist somit ein Mix aus der gesamten Inlandproduktion und den gesamten Importen in einem Jahr.

Für 2030-2050 wird mit zwei verschiedenen Szenarien gerechnet. Eines soll eine «Referenzentwicklung» abbilden und wurde von ewz bereitgestellt (ewz 2020) – dieses Szenario kann auch als «Business As Usual» oder «Weiter Wie Bisher» (WWB) bezeichnet werden; ein Teil des Stroms wird mit Gaskraftwerken erzeugt, um fluktuierende erneuerbare Energien auszugleichen. Es handelt sich um ein exploratives Szenario, das heisst, es ist kein Ziel hinterlegt. Der Fokus des ewz-Szenarios liegt auf der Abbildung möglicher Entwicklungen der Strompreise. Das andere Szenario soll die Stromversorgung innerhalb einer vollständig dekarbonisierten Gesellschaft im Jahr 2050 (Szenario "Netto-Null") abbilden und wurde von der Stadt Zürich für das Jahr 2050 spezifiziert (Stadt Zürich 2020). Für 2030 und 2040 wird zwischen 2020 und 2050 linear interpoliert. Aufgrund fehlender offizieller Grundlagen für den zukünftigen, erwarteten schweizerischen Strommix wurde für das Szenario "Netto-Null" eine Schätzung aufgrund der Potenziale vorgenommen. Die Annahme zu den Anteilen PV/Wind ist nicht so sensitiv, weil die Ergebnisse durch diese Annahme nicht wesentlich beeinflusst werden. Die Aussagen der Studie würden sich bei einer Änderung der Anteile PV/Wind nicht entscheidend verändern.

Zusätzlich zu LCA-Resultaten für elektrische Fahrzeuge, berechnet mit heutigen und zukünftigen Strommischen, werden auch welche berechnet unter der Annahme, dass der Strom von einer einzigen Art von Kraftwerk produziert wird; also beispielsweise LCA-Ergebnisse eines Mittelklasse Batteriefahrzeugs, dessen Batterie mit Strom ausschliesslich aus einem Windkraftwerk geladen wird. Dies dient der Abschätzung von Sensitivitäten. Ausserdem können damit mit

¹⁰ Strom zum Laden der Batterien von Batterieautos wird hier auch als Treibstoff bezeichnet.

¹¹ Systemmodell, «allocation, cut-off by classification».

vertretbarem Aufwand Ergebnisse unter Verwendung anderer Strommixe als hier verwendet berechnet werden.

Die Ökobilanzergebnisse werden jeweils auch für 2030/40/50 mit LCA-Ergebnissen der Stromproduktion einzelner Technologien von 2020 berechnet – das heisst beispielsweise, dass die Fotovoltaikanlage im Jahr 2020 Strom mit der gleichen Umweltbelastung produziert wie im Jahr 2050. Dieses vereinfachte Vorgehen musste wegen beschränkten Ressourcen gewählt werden, sollte jedoch die Schlussfolgerungen nicht wesentlich beeinflussen.

Die zukünftigen CH-Strommixe kommen nur dort zum Tragen, wo Strom in der Schweiz gebraucht wird. Dies ist der Fall beim Aufladen der Elektrofahrzeuge und bei der Wasserstoff-Herstellung für Brennstoffzellenfahrzeuge. Die übrigen Vorketten wie z.B. die Herstellung der Fahrzeuge und die Herstellung der Batterien werden mit einem globalen oder europäischen Strommix gerechnet.

Tabelle 18 gibt einen Überblick über die in dieser Studie verwendeten Strommixe, wobei hier lediglich die Anteile der einzelnen Primärenergieträger ausgewiesen werden. Für die Ökobilanzrechnungen wird jeweils noch unterschieden zwischen beispielsweise Lauf- und Speicherkraftwerken und verschiedenen Arten von Fotovoltaikanlagen; diese unterschieden sich aber hinsichtlich LCA-Ergebnissen nicht wesentlich. Für Stromimporte wird im Referenz- oder WWB-Szenario bis 2050 mit länder- und technologiespezifischen Importen gerechnet; für das Netto-Null-Szenario stehen solche Informationen nicht zur Verfügung und deswegen wird für Importe der durchschnittliche EU-Versorgungsmix für ein Klimaszenario bilanziert.

Tabelle 18 Stromversorgungsmixe Schweiz anhand der beiden Szenarien «Weiter-Wie-Bisher» und «Netto-Null». Relative Anteile einzelner Technologien (Produktion in der Schweiz) und von Stromimporten im Schweizer Versorgungsmix. * Produktion in der Schweiz und Importe; ** Importe gemäss jeweiligem EU-Strommix im Netto-Null-Szenario bzw. länderspezifisch im WWB-Szenario.

	Referenzszenario - "Weiter-Wie-Bisher" (WWB)				Szenario "Netto-Null"			
	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Wasserkraft	0.40	0.32	0.43	0.39	0.40	0.44	0.47	0.50
Kernenergie	0.17	0.13	0	0	0.17	0.12	0.06	0
Fotovoltaik	0.02	0.07	0.15	0.16	0.02	0.08	0.14	0.20
Windkraft*	0.00	0.01	0.02	0.03	0	0.07	0.13	0.20
Biomasse	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07
KVA	0.01	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.03
Erdgas	0.00	0.05	0.10	0.08	0.003	0	0	0
Importe (EU)**	0.37	0.39	0.26	0.31	0.37	0.25	0.12	0

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

4.1.3. Wasserstoff

Wasserstoff wird mittels PEM (Proton Exchange Membrane) Elektrolyse erzeugt: Wasser wird aufgesplittet in H_2 und O_2 , wofür Strom benötigt wird. Die Inventardaten stammen aus (Zhang et al. 2017). Der Strom kann aus verschiedenen Quellen stammen und wird hier identisch zur Schweizer Stromversorgung bilanziert, welche zum Laden der Batterieautos verwendet wird (Abschnitt 4.1.2). Zusätzlich besteht die Option, den Strom aus der EU zu importieren. Für diesen Fall wird der EU-Strommix für die Elektrolyse genutzt.

4.1.4. Synthetische Treibstoffe: Power-to-Gas, Power-to-Liquid

Die hier bilanzierten synthetischen Treibstoffe werden mittels sogenannter «Power-to-Gas» und «Power-to-Liquid» Verfahren erzeugt. Endprodukte sind synthetisches Erdgas bzw. synthetischer Diesel.

«Power-to-Gas» bezeichnet eine Prozesskette aus Elektrolyse und anschliessender Methanisierung von Wasserstoff mit CO_2 , welches hier mittels «Direct air capture» aus der Luft abgetrennt wird. Die Inventardaten stammen aus (Zhang et al. 2017).

«Power-to-Liquid» bezeichnet eine Prozesskette aus Elektrolyse und anschliessender Fischer-Tropsch-Synthese, wobei wiederum aus Wasserstoff und CO_2 aus der Luft flüssige Kohlenwasserstoffe, u.a. Diesel, erzeugt werden. Die Inventardaten wurden im Rahmen dieses Projekts erstellt und basieren grossteils auf (van der Giesen et al. 2014).

4.1.5. Biomethan

Biomethan wird erzeugt durch die Aufbereitung von Biogas aus anaerober Vergärung von Biomasse zu Methan. Dieses kann Erdgas ersetzen und ins Erdgasnetz eingespeist werden. Hier wird angenommen, dass Grünabfälle aus der Landwirtschaft und Haushalten oder Klärschlamm als Ausgangssubstanzen zur Biogasproduktion genutzt werden. Diese werden als Reststoffe betrachtet, der Vergärungsprozess demgemäss als Abfallentsorgungsprozess und das Biogas vor der Aufbereitung als «Nebenprodukt», dem keine Umweltbelastungen aus der Produktion angerechnet werden. Die Inventardaten stammen aus (Zhang et al. 2020) – Biogasaufbereitung mittels «amine scrubbing». Zu beachten ist, dass das Potenzial dieser Ausgangsstoffe recht klein ist und dementsprechend nur eine geringe Anzahl an Fahrzeugen damit betrieben werden kann.

4.2. Kosten

Annahmen zu Energiekosten werden pro Fahrzeugtyp und Jahr definiert. Die Defaultwerte der Energiekosten (Tabelle 19) sind sehr einfach definiert und sollen projektspezifisch angepasst werden. Die Energiekosten verstehen sich als durchschnittliche Kosten gerechnet über das ganze Fahrzeugleben¹², wobei die Amortisation der Lade- und Tank-Infrastruktur berücksichtigt wird.

Tabelle 19 Defaultwerte der Energiekosten

Energiekosten (CHF/kWh)		2020	2030	2040	2050
Velo	Strom	0.22	0.22	0.22	0.22
Tram	Strom	0.30	0.30	0.30	0.30
Trolleybus	Strom	0.30	0.30	0.30	0.30
Bus	Diesel	0.12	0.12	0.12	0.12
	Strom	0.30	0.30	0.30	0.30
	Wasserstoff	0.43	0.43	0.43	0.43
Motorrad	Benzin	0.18	0.18	0.18	0.18
	Strom	0.22	0.22	0.22	0.22
Personenwagen	Benzin	0.18	0.18	0.18	0.18
	Diesel	0.18	0.18	0.18	0.18
	CNG	0.175	0.175	0.175	0.175
	Strom	0.30	0.30	0.30	0.30
	Wasserstoff	0.43	0.43	0.43	0.43
Lieferwagen	Benzin	0.18	0.18	0.18	0.18
	Diesel	0.18	0.18	0.18	0.18
	CNG	0.175	0.175	0.175	0.175
	Strom	0.3	0.30	0.30	0.30
	Wasserstoff	0.43	0.43	0.43	0.43
Lastwagen	Diesel	0.18	0.18	0.18	0.18
	CNG	0.175	0.175	0.175	0.175
	Strom	0.30	0.30	0.30	0.30
	Wasserstoff	0.43	0.43	0.43	0.43
Kommunalmaschine	Benzin	0.18	0.18	0.18	0.18
	Diesel	0.18	0.18	0.18	0.18
	CNG	0.175	0.175	0.175	0.175
	Strom	0.3	0.30	0.30	0.30
	Wasserstoff	0.43	0.43	0.43	0.43

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

¹² Die Werte für 2030 sind also der Durchschnitt von 2030-2042 (Für Personenwagen mit 12 Jahren Lebensdauer)

5. Ergebnisse

Aus Platzgründen beschränken wir uns in diesem Bericht auf die Ergebnisse von Mittelklasse Personenwagen. Als Ergänzung zu diesem Bericht werden Grafiken für alle anderen Fahrzeugtypen mitgeliefert. In einem ergänzenden Bericht wird separat auf die Ergebnisse zu den Bussen eingegangen.

Alle Grafiken enthalten Ergebnisse, die mit den Defaultwerten aus der Exceldatei «Fahrzeugdefinitionen» berechnet worden sind. Es sind die Default Energie- und Batterie-Herstellungspfade berücksichtigt. Batterien werden mit Schweizer Durchschnittsstrom geladen (Für den Zustand 2020 wird mit dem heutigen CH-Strommix gerechnet, ab 2030 mit Szenario WWB) und Wasserstoff wird mit dem gleichen Strommix via Elektrolyse hergestellt. Diesel-, Benzin- und Gas-Fahrzeuge werden mit rein fossilem Brennstoff betankt¹³.

Die Säulen in den Grafiken sind mit den Durchschnittswerten berechnet. Die schwarzen horizontalen Striche zu den Säulen repräsentieren den Schwankungsbereich der Resultate und geben somit einen Hinweis auf die Unsicherheiten. Der tieferliegende Strich zeigt den minimalen Wert (BestCase), der höherliegende Strich gibt Auskunft über einen maximalen Wert (Worst-Case).

Erklärung der Begriffe:

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

¹³ 2019 Schweizer Durchschnitts-Biotreibstoffzumischung: Benzin 1.27%, Diesel, 5.22%, Gas 23.58%.

5.1. Standardergebnisse für Mittelklasse Personenwagen

5.1.1. Fahrzeugmasse

Abbildung 4 zeigt die Fahrzeugmasse für Mittelklasse Personenwagen. Die Zusammenstellung der Massen für 2020 und 2050 Mittelklasse Personenwagen ist in Anhang 2 zu finden. Die Fahrzeugmasse nimmt mit der Zeit tendenziell ab. Obwohl, vor allem für Personenwagen, Fahrzeuge in den letzten Jahren Jahr für Jahr grösser geworden sind, nehmen wir hier an, dass sich die Fahrzeuggrösse stabilisiert. Diese gleich grossen Fahrzeuge werden wegen technischen Fortschritten (z.B. optimierte Antriebsysteme) und Leichtbau in Zukunft leichter werden. Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sind im Jahr 2020 noch etwas schwerer als vergleichbare Verbrennungsfahrzeuge, holen aber schnell auf, da diese Systeme rapide verbessert, d.h. leichter werden.

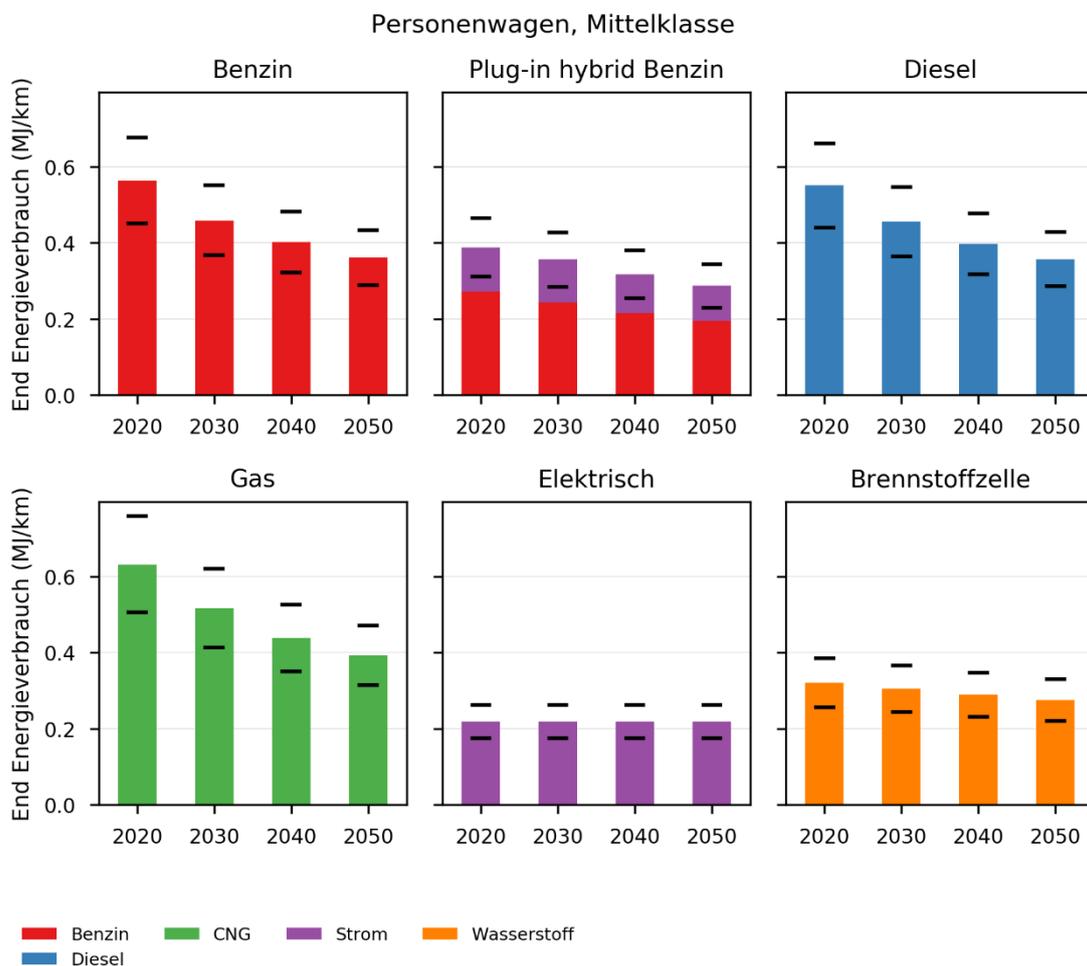
Obwohl die Fahrzeugmasse-Grafik Fehlerbalken zeigt, wird die Unsicherheit der Fahrzeugmasse in dieses Projekt nicht komplett abgebildet¹⁴. Die Unsicherheitsbalken zeigen nur die Streuungsbereiche der Batteriemasse anhand von Unsicherheit in der Batterieenergiedichte.

¹⁴ Fahrzeugmasse ist ein wichtiger Parameter, der bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren einen grossen Einfluss auf den Betriebsenergieverbrauch hat. Die angenommene Entwicklung bei der Fahrzeugmasse stammt aus der LCA-Modellierung. Es wird angenommen, dass die Materialien in Zukunft immer leichter werden. Allerdings wird hier der Treibstoffverbrauch von HBEFA genommen, und wird nicht im Modell gerechnet. Die Entwicklung des Treibstoffverbrauchs ist somit nicht 100% kongruent mit der Fahrzeugmasse. Deshalb ist die Fahrzeugmasse nicht komplett mit Unsicherheiten definiert.

verhaltensbedingte Energieverbrauchszuschlag etwa gleich gross sein wird wie die Verbesserungen in Bereichen wie Aerodynamik und Rollwiderstand und dass der Energieverbrauch daher in Zukunft konstant gehalten wird. Batteriefahrzeuge haben trotzdem mit Abstand am wenigsten Energieverbrauch pro Kilometer.

Die Unsicherheit des Energieverbrauchs ist mit +/- 20% für alle Fahrzeuge definiert worden.

Abbildung 5 Nutzungsphase Energieverbrauch von Mittelklasse Personenwagen



Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

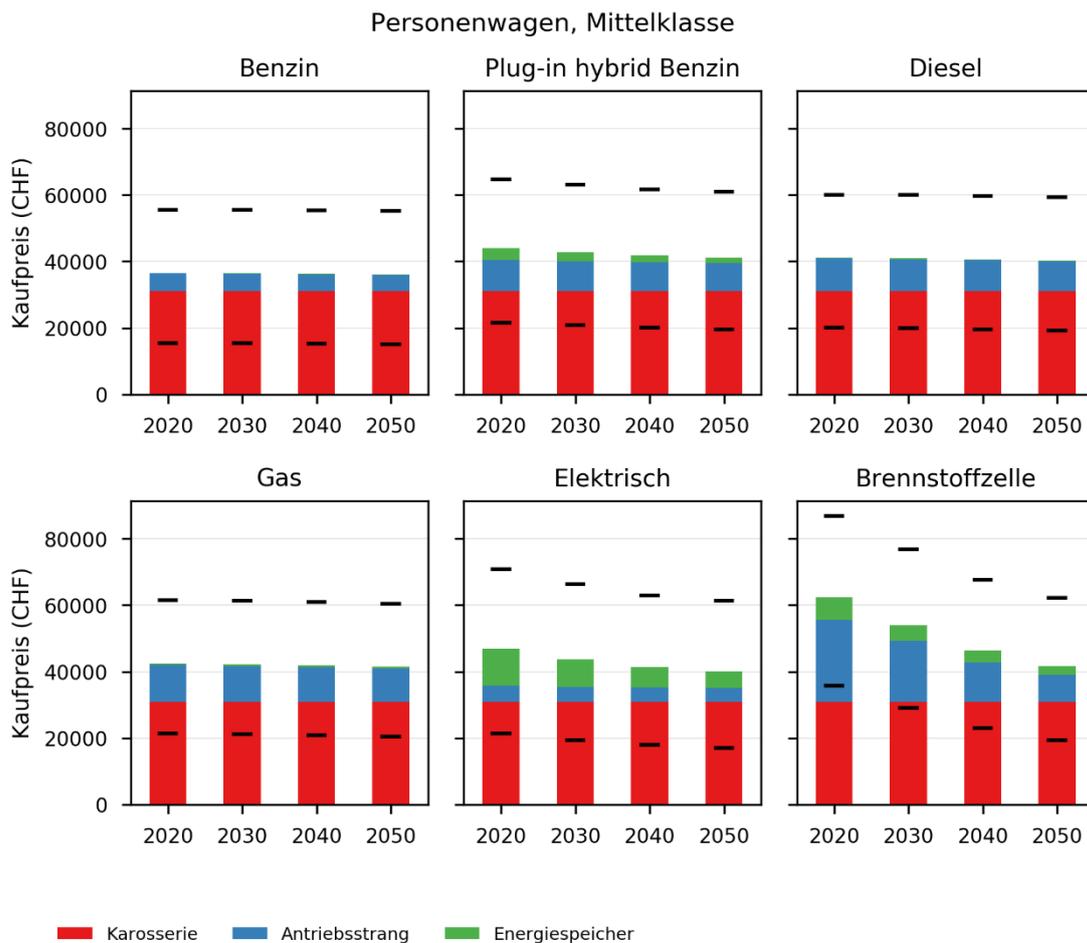
5.1.3. Kaufpreis

Abbildung 6 zeigt den Kaufpreis von Mittelklasse Personenwagen. Die Werte für 2020 und 2050 Mittelklasse Personenwagen sind im Anhang 3 zu finden. Es kann angenommen werden, dass

die Kaufpreise von Batterie- und, vor allem, Brennstoffzellen-Fahrzeugen mit höheren verkauften Stückzahlen deutlich sinken werden in den nächsten Jahren.

Die Streuungsbereiche der Kaufpreise von Personenwagen, Lieferwagen, Velos und Motorrädern sind sehr gross, da die Ausstattung von ähnlichen Fahrzeugen stark variieren kann. Hingegen sind die Streuungsbereiche für Fahrzeuge wie Lastwagen und Busse deutlich kleiner. Die grossen Fehlerbalken bei Personenwagen sollen hier aber nicht missverstanden werden. Die Fehlerbalken zeigen z.B. die Kaufpreisunterschiede zwischen einem einfachen Ford oder Skoda und einem Audi oder Tesla in Top-Ausstattung. Diese Fahrzeuge befinden sich zwar in der gleichen Grössenkatgorie, werden aber kaum die gleichen Käufergruppen ansprechen und sollten dementsprechend nicht direkt miteinander verglichen werden.

Abbildung 6 Kaufpreis von Mittelklasse Personenwagen



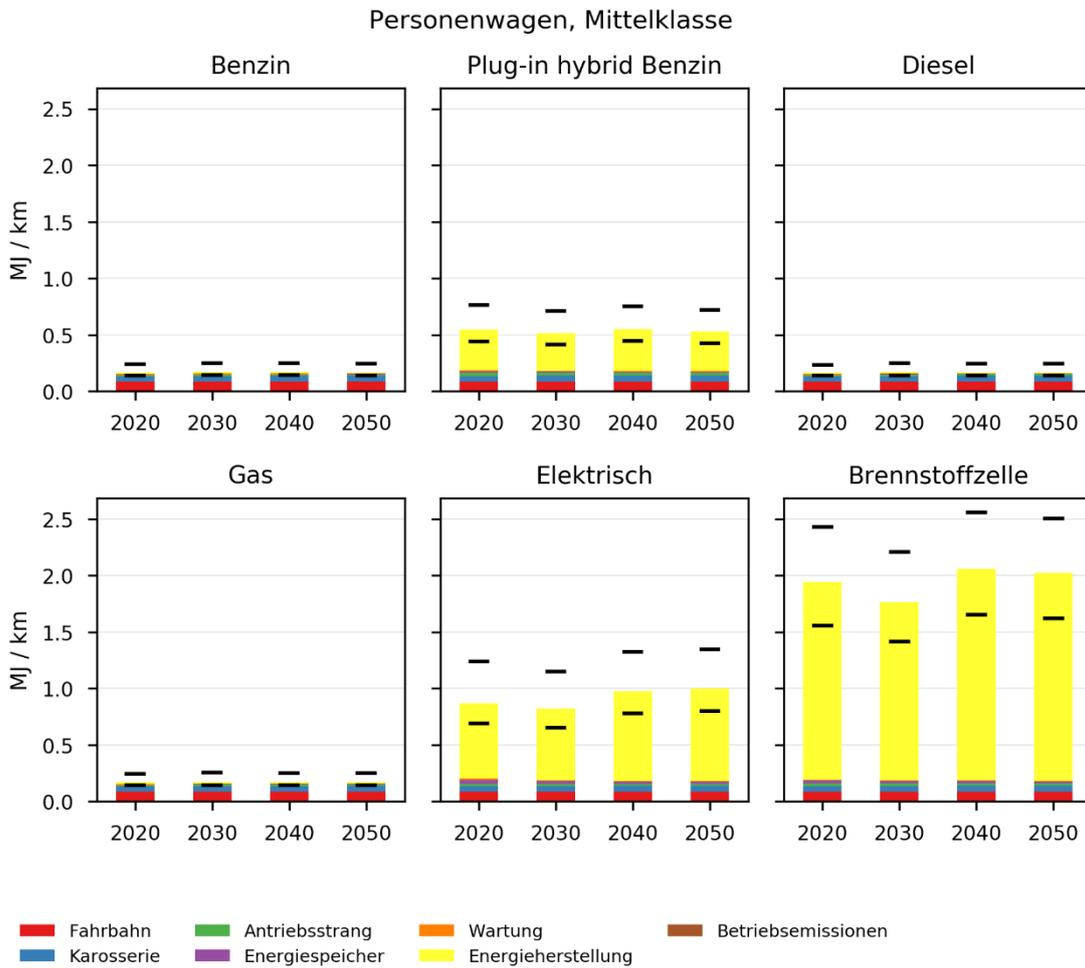
Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

5.1.5. Primärenergieverbrauch

Abbildung 8, Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen den Primärenergieverbrauch von Mittelklasse Personenwagen. Abbildung 8 zeigt den gesamte Primärenergieverbrauch (erneuerbar und nicht erneuerbar). Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen den erneuerbaren bzw. nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch. Im Gegensatz zum Endenergieverbrauch weisen Batteriefahrzeuge beim Primärenergieverbrauch pro Kilometer im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor einen weniger grossen Vorteil auf, da bei der Stromproduktion Umwandlungsverluste anfallen. Brennstoffzellenfahrzeuge brauchen etwas mehr Primärenergie als alle anderen, weil einerseits die Herstellung der Fahrzeuge energieintensiv ist und andererseits, weil durch die Umwandlungsverluste von Strom zu Wasserstoff und zurück zu Strom auch der Betrieb nicht besonders effizient ist.

Dank des erneuerbaren Stroms im Betrieb ist der Verbrauch an nicht erneuerbaren Energieträgern bei Batteriefahrzeugen viel geringer als bei Verbrennern. Um Verbrenner mit erneuerbarer Energie zu betreiben, kommen entweder Biotreibstoffe (Gasfahrzeuge) oder PtL (Benzin-, Dieselfahrzeuge) in Frage (Siehe Abbildung 20). Nachhaltige Biotreibstoffe wie Biomethan sind aber nur in einem sehr beschränkten Umfang verfügbar (weniger als 10% des heutigen Energiebedarfs des Strassenverkehrs in der Schweiz) und die Herstellung von synthetischen Treibstoffen ist sehr teuer und energieintensiv.

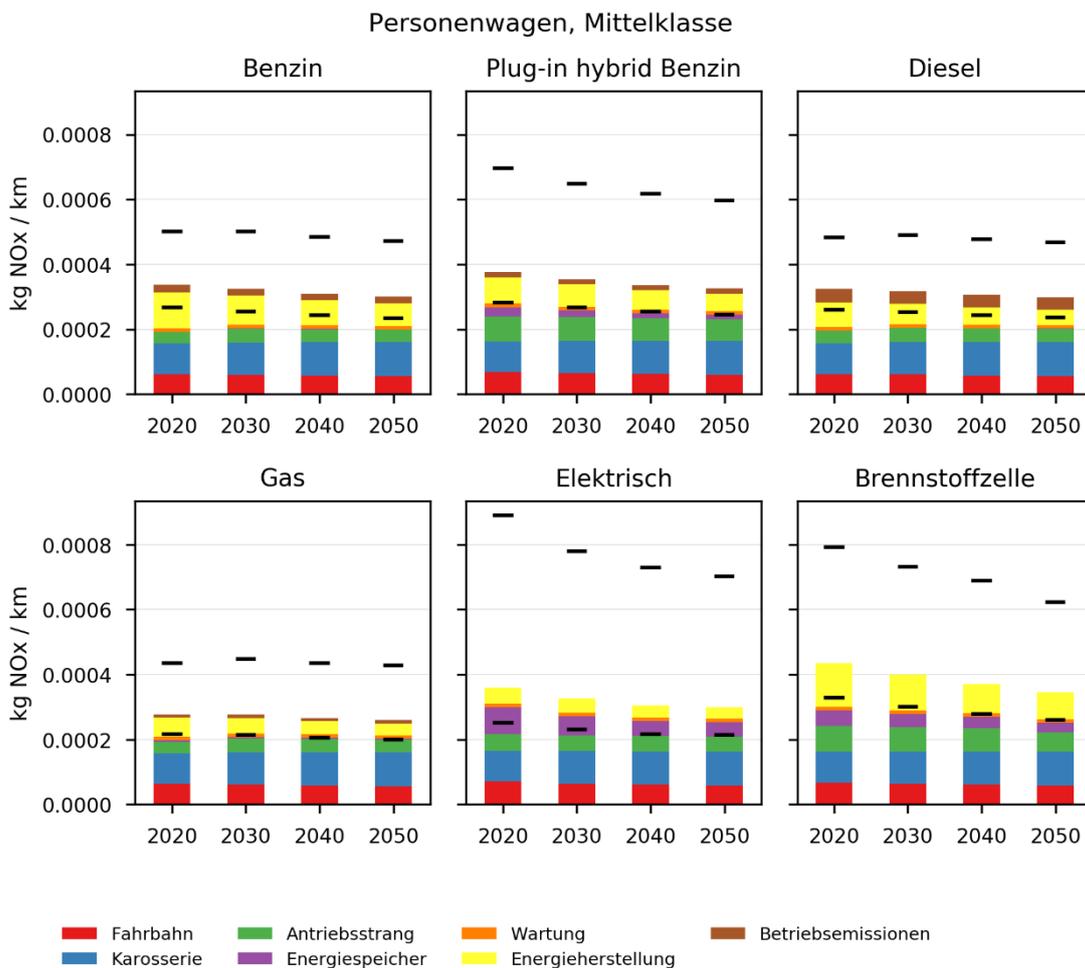
Abbildung 9 Primärenergieverbrauch erneuerbar von Mittelklasse Personenwagen



Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

Die Auswirkung von NO_x Emissionen auf die menschliche Gesundheit sind sehr stark abhängig vom Ort der Emissionen und ob Menschen davon betroffen sein können. NO_x Emissionen von beispielsweise einem Diesel-Personenwagen, der mittags im Zürcher Stadtzentrum fährt, werden hier gleich betrachtet wie NO_x Emissionen aus einer Nickelraffinerie in Sibirien, wo fast keine Menschen betroffen sind. Das heisst, dass lediglich die gesamten emittierten Mengen an NO_x ausgewiesen werden, diese aber keine Aussagen über gesundheitsschädliche Wirkungen zulassen. Grund dafür ist, dass eine Ökobilanz mit Einbezug der Bevölkerungsexposition äusserst aufwendig ist und innerhalb dieses Projekts nicht machbar war.

Abbildung 11 Lebenszyklus NO_x Emissionen von Mittelklasse Personenwagen



Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

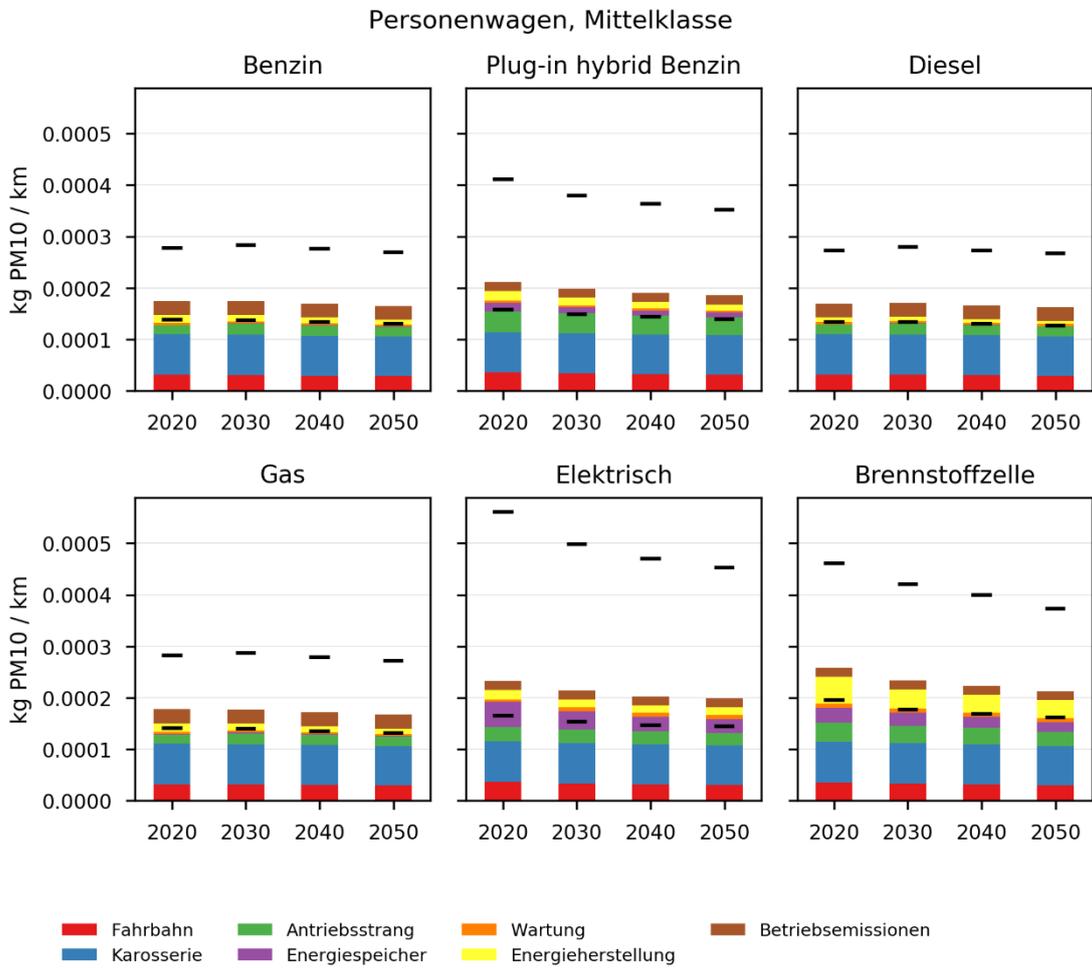
5.1.7. Lebenszyklus Feinstaubemissionen (PM₁₀)

Abbildung 12 zeigt die Lebenszyklus PM₁₀ Emissionen von Mittelklasse Personenwagen. Die Aussagen, die wir im Kapitel 5.1.6 gemacht haben bzgl. nicht möglicher Aussagen zu tatsächlichen Gesundheitseffekten, sind auch für die PM₁₀ Ergebnisse zutreffend. Die Betriebsphasenemissionen stammen aus zwei Quellen: Verbrennungsfahrzeuge emittieren PM₁₀ durch die Treibstoffverbrennung. Alle Fahrzeuge erzeugen auch PM₁₀ durch Bremsen-, Pneu- und Strassen-Abrieb.

Die Mehrheit der PM₁₀ Emissionen kommt aus der Vorkette, hauptsächlich aus der Fahrzeugherstellung. Die Herstellung von Batterien, Brennstoffzellen und Wasserstofftanks verursacht einiges an PM₁₀ Emissionen. Diese werden hauptsächlich über den Stromverbrauch (Vorketten) und die Aufarbeitung von Metallen wie Nickel, Kupfer und Platin verursacht. Auch der Stromverbrauch für die Herstellung von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff für Wasserstofftanks fällt hier ins Gewicht.

Die gesundheitlichen Auswirkungen der PM₁₀ Emissionen sind sehr komplex und müssen mit Vorsicht interpretiert werden. Partikel Emissionen verschiedener Grösse und chemischer Zusammensetzung haben sehr unterschiedliche Auswirkung auf die Gesundheit, zu denen wir hier keine Aussagen machen können.

Abbildung 12 Lebenszyklus PM₁₀ Emissionen von Mittelklasse Personenwagen

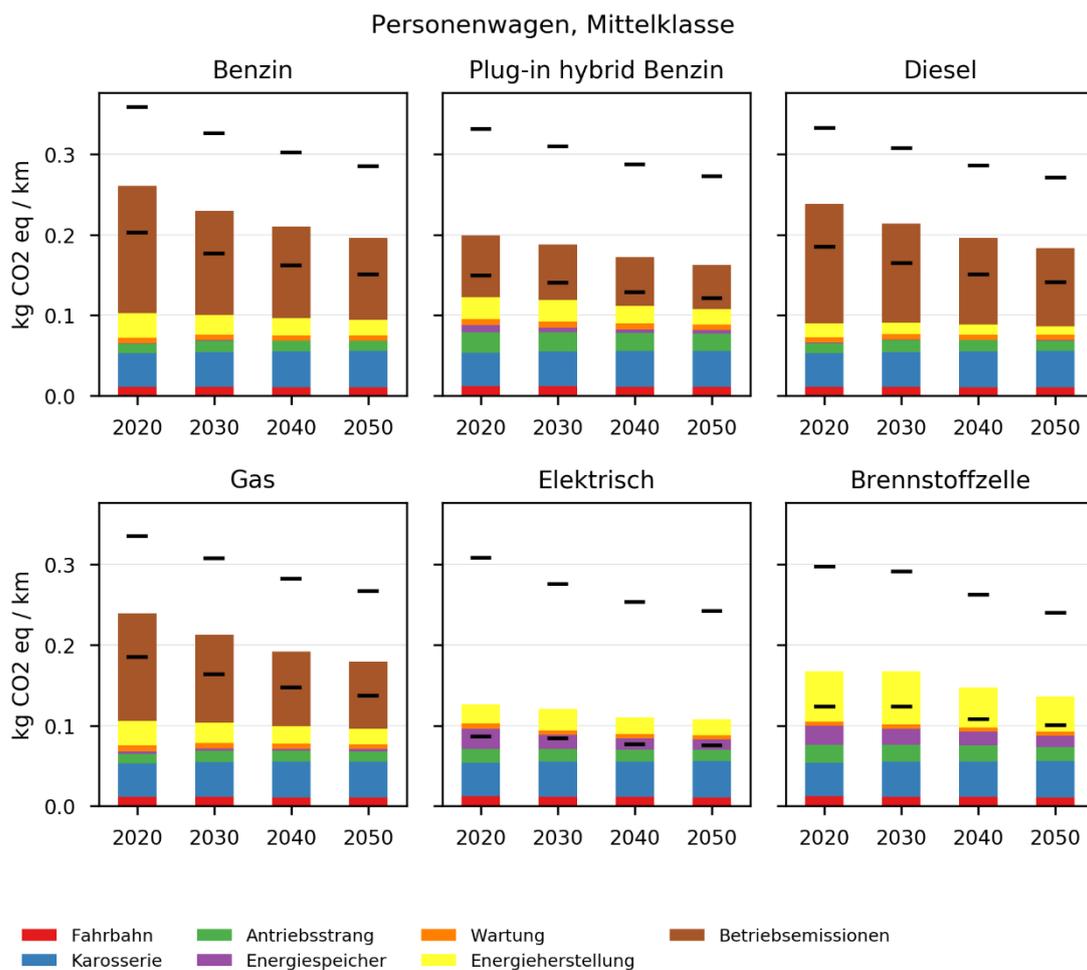


Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

5.1.8. Treibhausgase

Abbildung 13 zeigt die Treibhausgasemissionen von Mittelklasse Personenwagen. Die grossen Unsicherheitsbalken ergeben sich aus unterschiedlichen Annahmen zur Lebensfahrleistung. Obwohl Batteriefahrzeuge etwas mehr Treibhausgase emittieren während der Herstellungsprozesse als Verbrennungsfahrzeuge, haben sie deutlich weniger Emissionen in der Betriebsphase (auch mit der Berücksichtigung der Stromherstellung). Das heisst: je mehr mit einem Elektroauto gefahren wird, desto besser scheidet es vergleichsweise ab. Generell sind die Treibhausgasemissionen von Batterieautos dank des auch im WWB-Szenario CO₂-armen Stroms deutlich geringer als jene von Autos mit Verbrennungsmotoren und fossilen Treibstoffen. Dies gilt auch für Brennstoffzellenautos, wenn auch weniger stark, da mehr Strom pro Kilometer benötigt wird.

Abbildung 13 Treibhausgasemissionen von Mittelklasse Personenwagen



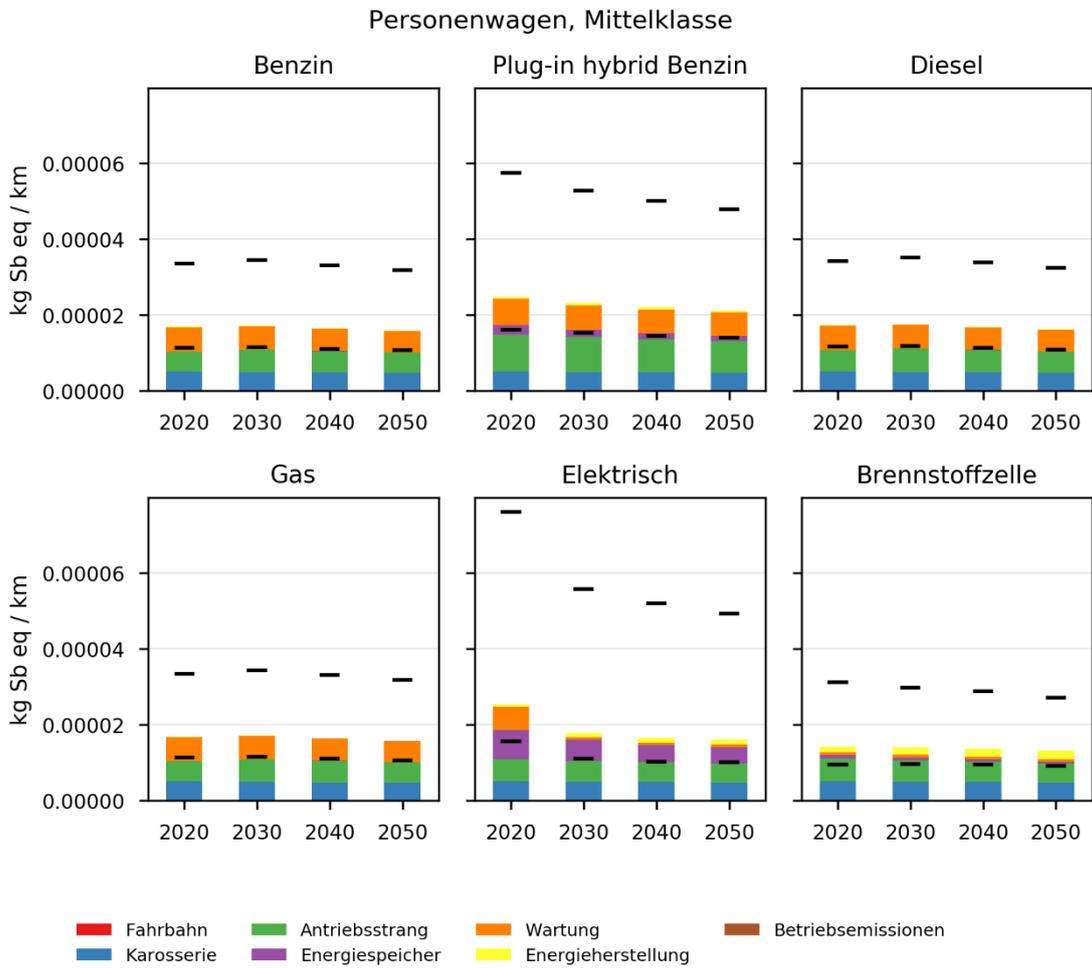
Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

5.1.9. Rohstoffverbrauch

Abbildung 14 zeigt die Ergebnisse für Rohstoffverbrauch von Mittelklasse Personenwagen. Rohstoffverbräuche sind stark von der Lebensfahrleistung abhängig, was die grossen Streuungsbereiche erklärt. Batteriefahrzeugen weisen für 2020 einen grossen Streuungsbereich auf, da im WorstCase die Batterie 1x ersetzt wird. Verbrennungsfahrzeuge haben Bleibatterien, die während der Wartung ersetzt werden, was die orangen Säulen erklärt.

Allgemein sind die Ergebnisse zu Rohstoffverbrauch mit Vorsicht zu interpretieren, da die Cut-off Modellierung von ecoinvent und die gewählte Wirkungsabschätzungsmethode nicht zusammenpassen. Die Sachbilanz mit Cut-off von Materialien, die einem Recycling zugeführt werden, weist einen zu hohen Wert aus für den Verbrauch von Rohstoffen, die im Recycling zurückgewonnen werden. Das kommt daher, dass das Modell vernachlässigt, dass die Materialien, die aus der Natur genommen werden, nicht verloren gehen, sondern nach der Nutzung zu fast 100% wieder zurückgewonnen werden können. Das ist insbesondere relevant für Metalle. Die Methode zur Wirkungsabschätzung berücksichtigt aber diese anthropogenen Lager nicht, sondern geht davon aus, dass ein Rohstoff verloren ist, wenn er der Natur entnommen wurde. Damit werden die Fahrzeuge, die aufgrund von gut wiederverwertbaren Materialien einen höheren Ressourcenbedarf aufweisen, systematisch benachteiligt. In unserem Fall sind das die Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge sowie, in kleinerem Masse, die Plug-in-Hybride. Fahrzeuge werden heute zu weit über 95% recycelt. Eine Lithiumbatterie von einem Elektrofahrzeug beinhaltet Materialien im Wert von über 2'500 – 3'000 CHF/t (Stand 2019). Es besteht also ein beträchtlicher ökonomischer Anreiz, diese Materialien zu recyceln. Die Bleibatterien, die bei Verbrennerfahrzeugen eine grosse Auswirkung verursachen, werden ebenfalls recycelt. In den letzten Jahren ist die Nachfrage nach Blei, vor allem für Autobatterien, deutlich gestiegen, was sich auch in steigenden Bleipreisen manifestiert hat. In Zukunft ist denkbar, dass Batteriefahrzeuge auf die (heute noch üblichen) Bleibatterien für die Versorgung der Bordelektronik verzichten, was, zusammen mit dem prognostizierten Rückgang von Verbrennerfahrzeugen, zu einer sinkenden Nachfrage nach Blei führen würde. In dem Fall wäre nicht mehr garantiert, dass Bleibatterien recycelt werden, weil der Bleipreis einbrechen würde.

Abbildung 14 Rohstoffverbrauch von Mittelklasse Personenwagen

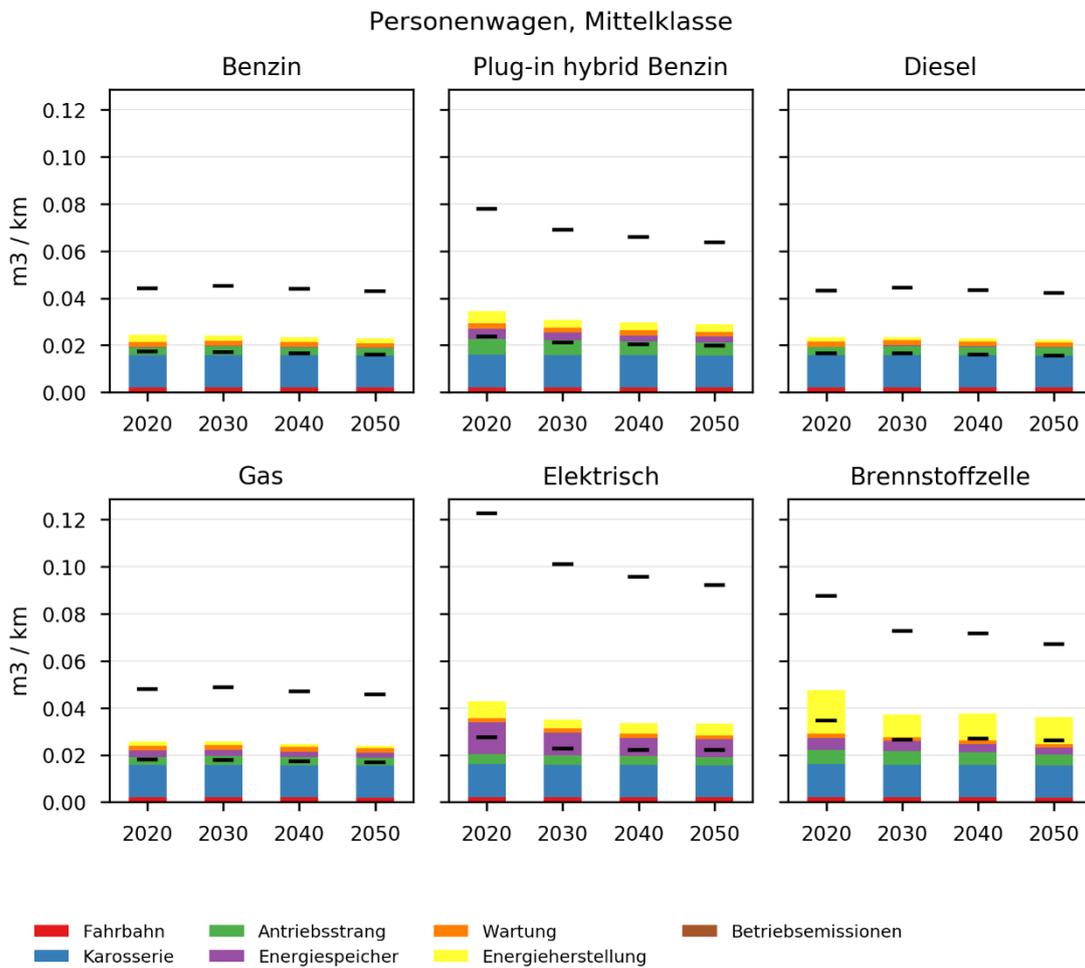


Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

5.1.10. Wasserverbrauch

Abbildung 15 zeigt die Wasserverbrauchsergebnisse für Mittelklasse Personenwagen. Die höheren Wasserverbräuche für Batterie- und Brennstoffzellen-Fahrzeugen beruhen auf Verdunstung in Schweizer Stauseen.

Abbildung 15 Wasserverbrauch von Mittelklasse Personenwagen



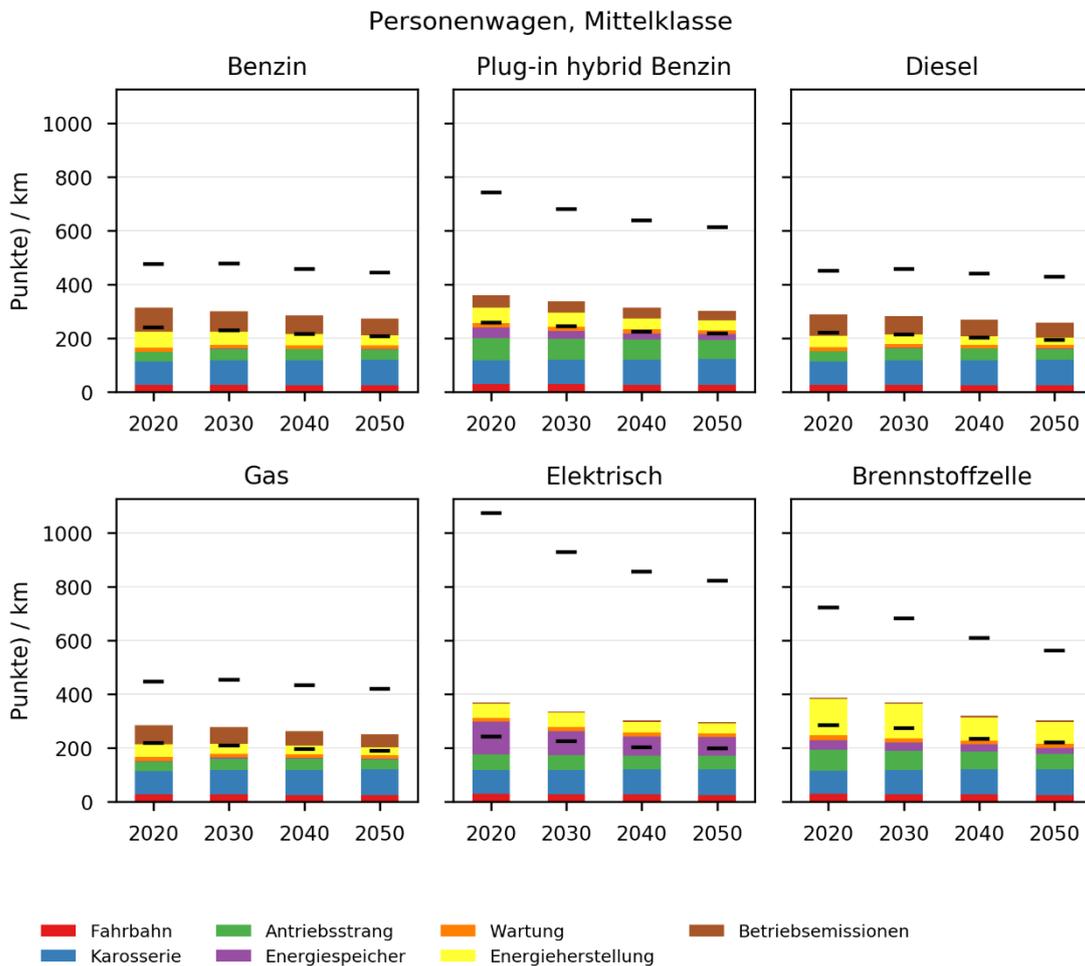
Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

5.1.11. Ökologische Knappheit (Umweltbelastungspunkt, UBP)

Abbildung 16 zeigt die UBP Ergebnisse für Mittelklasse Personenwagen. Nach dieser Methodik schneiden Batteriefahrzeuge etwa gleich ab wie Verbrennungsfahrzeuge. Allerdings sind die Unterschiede klein und die Unsicherheiten gross. Die Beiträge aus der Batterieproduktion werden vor allem von radioaktiven Abfällen verursacht, da Kernenergie Teil der Stromversorgung der Produktionsketten ist. Die grossen Streuungsbereiche, die hier gezeigt werden, ergeben sich primär aus den unsicheren Lebensfahrleistungen und sekundär aus den Unsicherheitsparametern für Batterieersatz und Batterieenergiedichte. Die Unsicherheiten in der UBP Methodik (hier nicht abgebildet) sind auch sehr gross und machen es schwer, aussagekräftige Schlüsse zu ziehen.

Wie in Kap. 2.3 beschrieben ist, stimmt die Treibhausgasgewichtung der UBP nicht mehr mit den aktuellen Vorgaben der Schweizer Klimapolitik (Netto-Null im Jahr 2050) überein. Dieses Ziel bedingt mindestens eine Halbierung des Zielwertes für THG Emissionen gegenüber dem Wert, der in der UBP-Methodik angewendet wird. Das würde den UBP Faktor für THG Emissionen von 0.46 UBP/g CO₂-eq auf über 2 UBP/g CO₂-eq erhöhen. Somit sollte das Gewicht von THG Emissionen um den Faktor 4 höher liegen als in UBP 2013. Mit korrigierten UBP würden die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren deutlich schlechter abschneiden, während die UBP von batterieelektrischen Fahrzeugen viel weniger erhöht würden.

Abbildung 16 Ökologische Knappheit Ergebnisse für Mittelklasse Personenwagen



Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

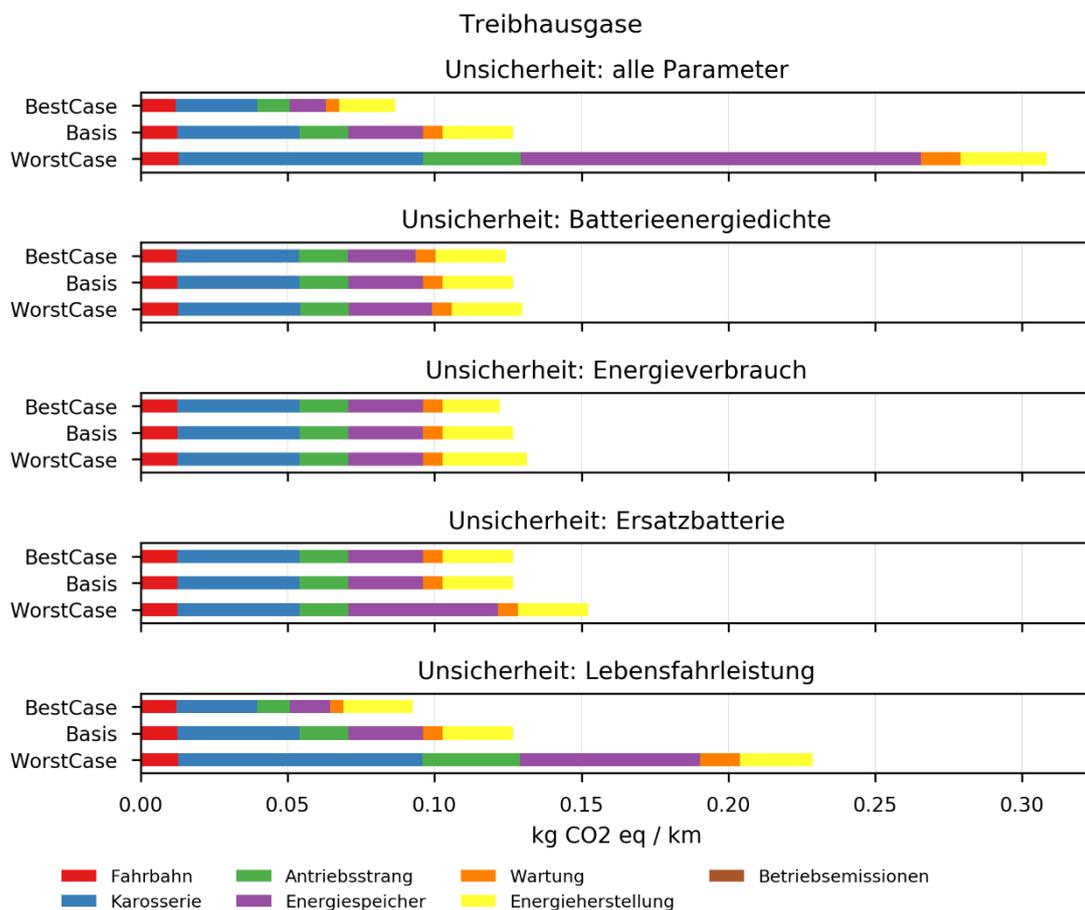
5.1.12. ReCiPe Total

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse für Mittelklasse Personenwagen nach ReCiPe Total gerechnet. Hier schneiden Batteriefahrzeuge etwas besser ab als Verbrennungsfahrzeuge, da diese Methodik mehr Gewicht auf Treibhausgase legt. Auch hier sind die grossen Streuungsbereiche, die hier gezeigt werden, primär auf die Annahmen zu Lebensfahrleistungen und sekundär auf die Unsicherheitsparameter für Batterieersatz und Batterieenergiedichte zurückzuführen. Die Unsicherheiten in der ReCiPe Methodik (hier nicht abgebildet) sind aber auch sehr gross und machen es schwer, aussagekräftige Schlüsse zu ziehen.

Abbildung 17 ReCiPe Total Ergebnisse für Mittelklasse Personenwagen

Die Auswirkungen der unsicheren Parameter können aber auch einzeln analysiert werden. Abbildung 18 zeigt eine solche Analyse für 2020 gebaute batterieelektrische Mittelklasse Personenfahrzeuge. Hier sehen wir, dass der grösste Teil der Unsicherheiten von der unsicheren Lebensfahrleistung kommt und die Kombination von mehreren «WorstCase» Annahmen deutlich höhere Emissionen ergeben. Die Ergebnisse, die in Abbildung 18 gezeigt werden, sind für alle Wirkungsabschätzungsmethoden im Anhang zu finden.

Abbildung 18 Unsicherheitsanalyse 2020 für batterieelektrischen Mittelklasse Personenwagen



Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

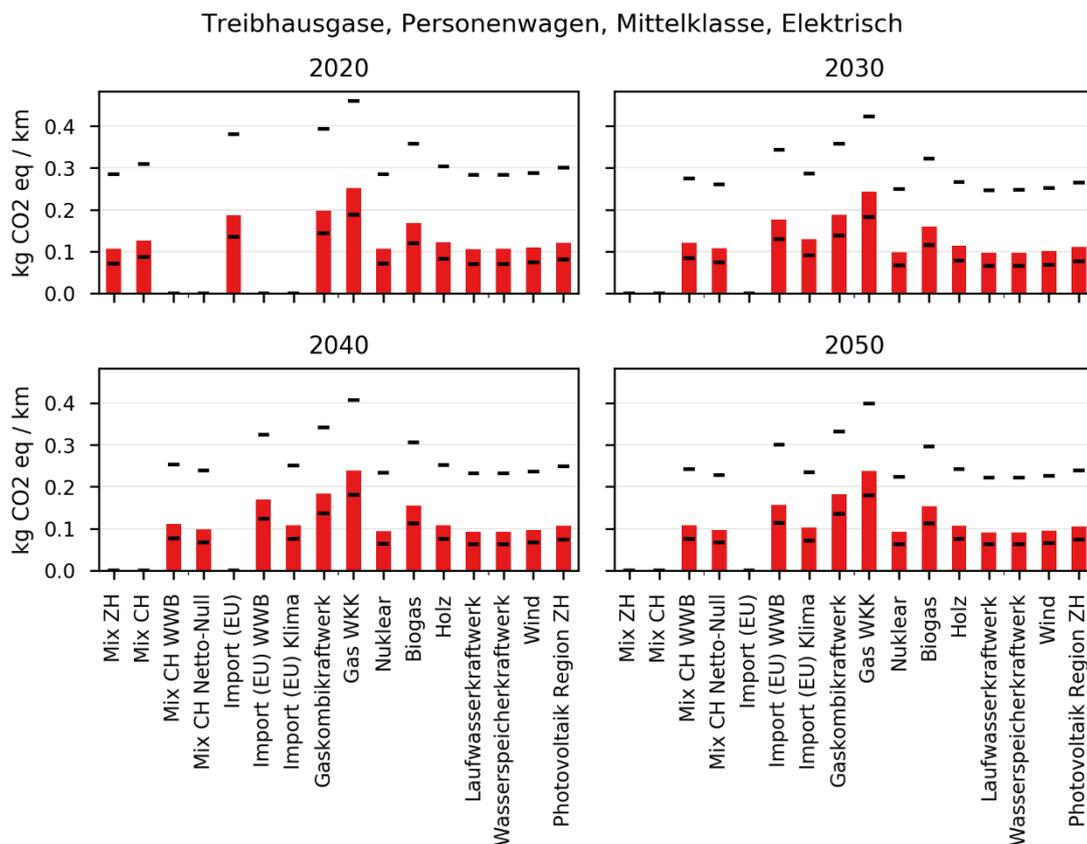
5.3. Sensitivität Treibstoffversorgung

Die Defaultfahrzeuge im Excel-Tool und die Ergebnisse in Kapitel 5.1 werden mit Standard Energieketten gerechnet. Das Excel-Tool kann aber Fahrzeuge mit allen Energieketten von Tabelle 3 berechnen. Hier zeigen wir Treibhausgasemissionen für Mittelklasse Personenwagen mit verschiedenen Arten der Stromversorgung (Abbildung 19) und verschiedene Diesel- und

CNG-Herstellungsketten (Abbildung 20). Ergebnisse für verschiedene Wasserstoffherstellungsketten und alle Wirkungsabschätzungsmethoden für Mittelklasse Personenwagen sind im Excel-Tool vorhanden und in den ergänzenden Grafiken zu finden.

Abbildung 19 zeigt Treibhausgasergebnisse für batteriebetriebene Mittelklasse Personenwagen mit verschiedenen Stromketten für das Laden der Batterie. Nicht vorhandene Säulen bedeuten, dass diese Strommixe für ein spezifisches Jahr nicht definiert bzw. anwendbar sind. Wie schon aus der Literatur bekannt, ist der Strommix, der zum Laden der Batterie benutzt wird, entscheidend für die Lebenszyklus Treibhausgasemissionen von Batteriefahrzeugen. Die grossen Fehlerbalken ergeben sich vor allem aus den unsicheren Lebensfahrleistungen – den zweiten entscheidenden Faktor für die Treibhausgasemissionen von Batteriefahrzeugen.

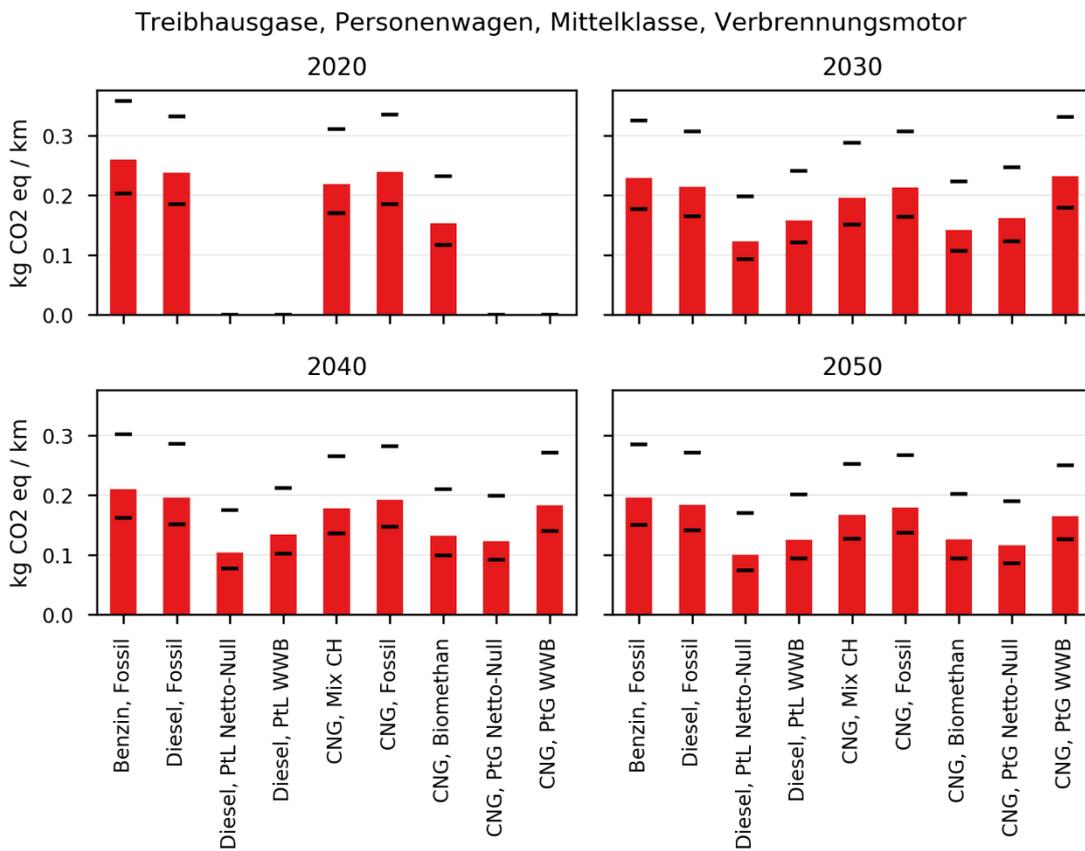
Abbildung 19 Treibhausgasemissionen von Mittelklasse Personenwagen - Sensitivitätsanalyse Energieketten: Strom



Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

Abbildung 20 zeigt die Treibhausgasemissionen für verschiedene Diesel- und CNG-Herstellungsketten. Vor allem die Ergebnisse für Dieselfahrzeuge mit PtL sehen vielversprechend aus. Ihren Treibstoffverbrauch ist vergleichbar mit einem Batteriefahrzeug. Allerdings brauchen sie fast zweifach mehr Primärenergie pro Kilometer als ein Batteriefahrzeug, da der PtL-Prozess recht ineffizient ist.

Abbildung 20 Treibhausgasemissionen von Mittelklasse Personenwagen - Sensitivitätsanalyse Energieketten: Benzin, Diesel, CNG



Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

6. Zürich Mobilitäts-Umweltindex (ZMU)

6.1. Ziel und Zweck des „Zürich Mobilitäts-Umweltindex“

Die Entwicklung des „Zürich Mobilitäts-Umweltindex (ZMU)“ erlaubt es, die verschiedenen, relevanten Umweltaspekte dieser Studie zu einem Indexwert zu aggregieren und dabei eine einfache Entscheidungsgrundlage für den Kanton und die Stadt Zürich bereitzustellen. Dabei werden die Ergebnisse aus dem Life Cycle Assessment (Lebenszyklusanalyse, Ökobilanz, LCA) mit weiteren relevanten Aspekten wie Lärm und Raumbedarf, die typischerweise im Rahmen einer LCA nicht bewertet werden oder deren Implementierung noch nicht in allen Bewertungsmethoden erfolgt, im Index aggregiert. Die ZMU-Faktoren werden für den Zustand 2020 bestimmt¹⁵; Prognosen sind nicht möglich.

Das Zusammenführen von verschiedenen Umweltaspekten zu einem Index beinhaltet subjektive Elemente. Deshalb war es wichtig, die ZMU-Faktoren in möglichst enger Zusammenarbeit mit dem Kanton und der Stadt Zürich zu entwickeln. Dies geschah, indem die Begleitgruppe dieser Studie die Kernelemente der Faktoren im Rahmen eines Workshops erarbeitet hat.

6.2. Methode

6.2.1. Erarbeitung der Gewichtung verschiedener Umweltaspekte

Die Ergebnisse einer Ökobilanz werden üblicherweise in verschiedenen Wirkungsgrössen ausgedrückt, welche die Auswirkungen für verschiedene Umweltproblemfelder abbilden. Zum Beispiel werden die Treibhausgasemissionen zu einer Wirkungskategorie, Nährstoffauswaschungen zu einer anderen Wirkungskategorie zusammengeführt. Zu jeder dieser Wirkungskategorien (Treibhauspotential, Eutrophierungspotential, Versauerungspotential, etc.) werden quantitative Indikatoren definiert (z.B. kg CO₂-eq (100a), kg SO₂-eq).

Die Aggregation solcher Indikatoren zu einem Index erfolgt durch eine Multiplikation der Ergebnisse der verschiedenen Indikatoren mit Gewichtungsfaktoren, welche die Bedeutung der verschiedenen Indikatoren abbilden und damit eine Priorisierung der Umweltprobleme reflektieren. Tatsächlich können in einer vergleichenden Ökobilanz von verschiedenen Produktvarianten Zielkonflikte bezüglich der Umweltauswirkungen erscheinen: Eine Senkung der Treibhausgase von Fahrzeugen könnte mit einer Erhöhung des Ressourcenverbrauchs wie z.B. von Metallen einhergehen (u.a. durch die gesteigerte Nachfrage an Batterien für Elektrofahrzeuge). Indem vorab eine Priorisierung der Umweltprobleme definiert wird, können Szenarien gegeneinander

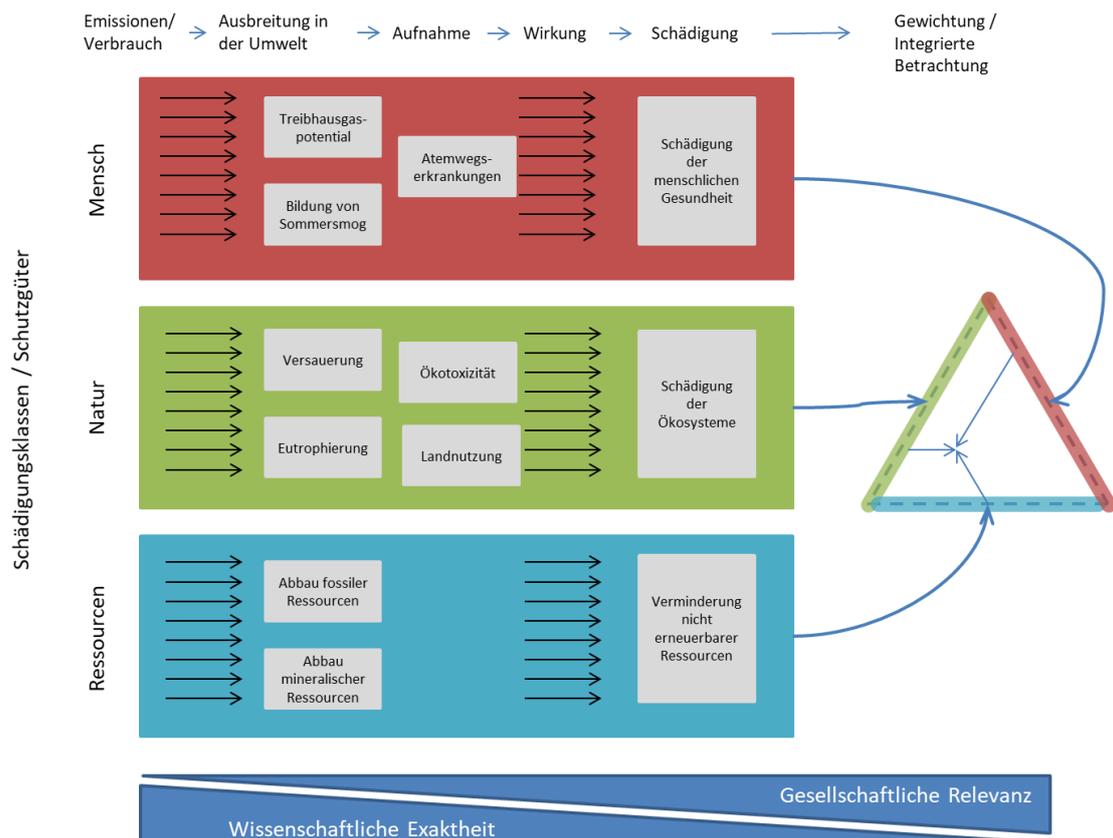
¹⁵ Die Fahrzeuge in den Jahren 2030/40/50 werden dementsprechend mit den heutigen ZMU-Faktoren bewertet.

inander bewertet werden. Dieser Schritt war insbesondere in dieser Studie nötig, weil die verwendeten aggregierenden Methoden (ReCiPe und Methode der Ökologischen Knappheit) die Aspekte Raumbedarf und Lärmpegel des Fahrzeugs nicht oder nur teilweise berücksichtigen¹⁶ und auch die spezifischen Prioritäten von Kanton und Stadt Zürich nicht berücksichtigen.

Die folgende Abbildung zeigt, wie eine Wirkungsmethode für eine Ökobilanz aufgebaut wird. Ausgehend von den Emissionen, respektive dem Ressourcenverbrauch wird die Wirkung mit Modellen berechnet, die die Ausbreitung der Stoffe in die Umwelt, die Aufnahme, die Wirkung und schlussendlich die Schädigung von schützenswerten Gütern wie der menschlichen Gesundheit, der Ökosysteme oder von Ressourcen berücksichtigen. Die wissenschaftliche Exaktheit ist am Anfang der Modellkette am höchsten. Demnach wird die Erfassung der Stoffe und Ressourcen wissenschaftlich exakt eingeschätzt, während die gesellschaftliche Relevanz auf der anderen Seite zunimmt, da dort für die Gesellschaft wichtigen Aussagen gemacht werden: Welche Schutzgüter werden durch eine Produktvariante am meisten gefährdet?

¹⁶ Die Methode der Ökologischen Knappheit basiert die Bewertung des Lärms auf L_{max} und nicht L_{eq} . Hier wird L_{eq} verwendet.

Abbildung 21: Aufbau einer Wirkungsabschätzung für die Ökobilanzen; Beispiel der Methode „Eco-Indicator ,99“. Die Seiten des Dreiecks repräsentieren Werte von 0 zu 100%; dabei entspricht die Summe der drei gewählten Punkte entlang der Seiten des Dreiecks 100%. Quelle: (Zah et al. 2007)



Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

Da für die Bestimmung von Gewichtungsfaktoren kein rein objektives oder rechnerisches Vorgehen existiert, ist es wichtig, einen möglichst grossen Konsens für die Gewichtungsfaktoren zu erreichen.

6.2.2. Indikatoren für die Studie

Wie im Kapitel 2.3 beschrieben, werden die Ergebnisse der aktuellen Studie speziell für folgende Indikatoren ausgewiesen. Je nach Indikator beinhalten die Ergebnisse nur die Nutzungsphase oder werden über die ganze Lebensdauer aggregiert (kumuliert). Für die Berechnung der ZMU-Faktoren wird ein Indikatorsatz gewählt, der sowohl lokale Aspekte (Schadstoffemissionen der Fahrzeuge, Lärm etc.) als auch globale Aspekte (bspw. CO₂-Emissionen) berücksichtigt (Tabelle 20).

Tabelle 20: Indikatoren und ihr Umfang in dieser Studie. Die Einheit bezieht sich jeweils auf den Referenzfluss (pro km bzw. pro Stunde).

Indikatoren	Einheit	Kumuliert / nur Nutzungsphase	Im ZMU-Index
Treibhausgase (CO ₂ -Äquivalente)	kg CO ₂ -eq	Kumuliert	ja
Energieverbrauch (erneuerbar und nicht erneuerbar)	MJ	Kumuliert	ja
Luftschadstoffe (PM ₁₀ , NO _x)	kg	Nutzungsphase	ja
Lärm	DALY ¹⁷	Nutzungsphase	ja
Rohstoffverbrauch (abiotischer Ressourcenabbau)	kg Sb-eq	Kumuliert	ja
Wasserverbrauch	m ³	Kumuliert	ja
Raumbedarf	m ² *a	Nutzungsphase	ja
ReCiPe 2008, aggregierte Indikatoren	Punkte	Kumuliert	teilweise

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

6.3. Normalisierung der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden zuerst zu einer gemeinsamen Einheit umgewandelt. Dies geschieht durch Normalisierung. Dabei wird gemäss ISO 14'040/-44 das Indikatorergebnis für die funktionelle Einheit in einer Studie durch das Indikatorergebnis eines arbiträr gewählten grösseren Systems (zum Beispiel die CO₂-eq Emissionen in ganz Europa in einem bestimmten Jahr) dividiert.

Zum Beispiel dividiert man die Menge Treibhausgasemissionen des Fahrzeugs (kg pro km) durch den pro-Kopf Treibhausgasausstoss pro Jahr: Damit erhält man eine Grösse (mit der Einheit „Person*Jahr“), die das Verhältnis zwischen der Belastung durch das Fahrzeug und der aktuellen Belastung erstellt und damit die Frage beantwortet, wie gross der Beitrag des betrachteten Fahrzeugs zu den totalen Emissionen sämtlicher Quellen in einer bestimmten Region ist. Die folgende Tabelle stellt die Normalisierungswerte für die gewählten Wirkungsindikatoren zusammen.

¹⁷ disability-adjusted life years

Tabelle 21: Normalisierungswerte für die ZMU-Faktoren. Die Werte beziehen sich auf eine Pro-Kopf Fracht. Für die lokalen Indikatoren (Luftschadstoffe, Lärm, Raumbedarf) wurde der Kanton Zürich als Systemgrenze definiert. Für die kumulierten, globalen Indikatoren (z.B. Treibhausgase) wurden globale Werte genommen.

Indikatoren	Normalisierungswert (Einheit per Person und Jahr)		Geltungsbe- reich	Quelle
	Einheit	Wert		
PM ₁₀	kg	1.39E+00	lokal	econcept 2018, Tab. 58
NO _x	kg	5.63E+00	lokal	econcept 2018, Tab. 58
Lärm	DALY	2.18E-02	lokal	ReCiPe 2008 für menschliche Gesundheit ohne THG, inkl. Auswirkungen des Lärms auf die Gesundheit ¹⁸
ReCiPe Menschliche Gesundheit (ohne Treibhausgase)	DALY	2.18E-02	global	ReCiPe 2008 für menschliche Gesundheit ohne THG, inkl. Auswirkungen des Lärms auf die Gesundheit ¹⁹
Treibhausgase (CO ₂ -eq)	kg CO ₂ -eq	6.89E+03	global	ReCiPe 2008 ²⁰
ReCiPe Natur/Ökosysteme (ohne Treibhausgase)	Species * year	9.17E-04	global	ReCiPe 2008 für Natur/Ökosysteme ohne THG ²¹
Rohstoffverbrauch	kg Sb-eq	5.32E-01	global	ILCD method 2.0
Energieverbrauch, nicht-erneuerbar	MJ	2.38E+05	national	Jungbluth 2012, für die Schweiz
Energieverbrauch, erneuerbar	MJ	2.38E+05	national	Jungbluth 2012, für die Schweiz
Wasserverbrauch	m ³ -eq	1.15E+04	global	ILCD Methode
Raumbedarf	m ²	2.71E+07	lokal	theoretisch beanspruchte Fläche aufgrund Fahrleistung im Kanton Zürich

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

6.3.1. Gewichtung

Die Gewichtungsfaktoren wurden im Rahmen eines Workshops mit der Begleitgruppe am 6. Februar 2020 entwickelt. Dabei mussten die TeilnehmerInnen zuerst die verschiedenen Schutzgüter gegeneinander gewichten, indem jede/r Teilnehmer/in jedem Schutzgut einen Wert gab. Die Summe der Bewertung wurde einer Kategorie von 1 bis 5 zugeordnet, die eine gemittelte Punktzahl erhielt, um eine gewisse Zufälligkeit der Resultate zu glätten. Die Anteile der Schutzgüter wurden anschliessend auf eine Stelle gerundet. Es wurden zwei Gewichtungssets unterschieden: «global» und «lokal». Im «globalen» Gewichtungsset wurden die globalen Aspekte,

¹⁸ Die ReCiPe-Werte beinhalten keine Lärmauswirkungen. Da diese in ähnlicher Grössenordnung wie für Feinstaub sind, ist es wichtig, sie zu berücksichtigen. Da globale Werte fehlen, werden die Schweizer Zahlen benutzt (ECOPLAN 2019).

¹⁹ Die ReCiPe-Werte beinhalten keine Lärmauswirkungen. Da diese in ähnlicher Grössenordnung wie für Feinstaub sind, ist es wichtig, sie zu berücksichtigen. Da globale Werte fehlen, werden die Schweizer Zahlen benutzt (ECOPLAN 2019).

²⁰ Kohärenz mit anderen kumulierten Indikatoren, auch weil Klimaveränderung ein globales Problem ist. Zudem führen die hohen CH-Werte zu tieferer Bedeutung des Indikators.

²¹ Analog zu ReCiPe

wie beispielsweise Klimaveränderung stärker gewichtet, im «lokalen» sind es vor allem Lärm und Raumbedarf.

Tabelle 22: Anzahl vergebener Punkte und Anteile der Schutzgüter als Resultat des Workshops vom 6.2.2020.

Indikatoren	Gewichtungsset GLOBAL			Gewichtungsset LOKAL		
	Anzahl vergebener Punkte	Klasse	Mittelwert	Anzahl vergebener Punkte	Klasse	Mittelwert
Luftschadstoffe (PM ₁₀ , NO _x)	7	II	8.0	22	V	23.0
Lärm	4	I	2.5	15	III	13.0
ReCiPe Menschliche Gesundheit (ohne Treibhausgase)	12	III	13.0	8	II	8.0
Treibhausgase (CO ₂ -Äquivalente)	21	V	23.0	8	II	8.0
ReCiPe Natur/Ökosysteme (ohne Treibhausgase)	18	IV	18.0	18	IV	18.0
Rohstoffverbrauch	12	III	13.0	0	I	2.5
Energieverbrauch, nicht-erneuerbar	15	III	13.0	8	II	8.0
Energieverbrauch, erneuerbar	6	II	8.0	8	II	8.0
Wasserverbrauch	12	III	13.0	0	I	2.5
Raubedarf	3	I	2.5	23	V	23.0
	110			110		

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

Aus dem prozentualen Anteil der Punktezahl des einzelnen Indikators innerhalb des Schutzgutes wurde der finale Gewichtungsfaktor des Indikators berechnet.

Tabelle 23: finale Gewichtungsfaktoren für den ZMU-Index

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

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

6.3.2. Finale ZMU-Faktoren

Die ZMU-Faktoren berechnen sich aus der Normalisierung und Gewichtung mit folgender Formel:

$$\text{ZMU-Faktor [Person * Jahr / Einheit]} = 1 / \text{Normalisierungswert [Person * Jahr / Einheit]} * \text{Gewichtungsfaktor [\%]} * \text{Konstante}^{22} (1'000'000)$$

²² Die Konstante erlaubt besser lesbare Werte für diese Anwendung. Sonst wären die Punkte in der Grössenordnung von 10⁻³ - 10⁻⁶

Tabelle 24: finale ZMU-Faktoren

Indikatoren	Einheit	Global	Lokal
		[Person * Jahr / Einheit]	[Person * Jahr / Einheit]
PM ₁₀	kg	3.68E+04	9.37E+04
NO _x	kg	9.07E+03	2.31E+04
Lärm	DALY	1.47E+06	6.90E+06
ReCiPe Menschliche Gesundheit (ohne Treibhausgase)	DALY	7.63E+06	4.14E+06
Treibhausgase (CO ₂ -Äquivalente)	kg CO ₂ -eq	3.26E+01	1.31E+01
ReCiPe Natur/Ökosysteme (ohne Treibhausgase)	species*year	1.91E+08	2.29E+08
Rohstoffverbrauch	kg Sb-eq	1.48E+05	1.88E+04
Energieverbrauch, nicht-erneuerbar	MJ	3.31E-01	1.68E-01
Energieverbrauch, erneuerbar	MJ	2.04E-01	1.68E-01
Wasserverbrauch	m ³ -eq	6.85E+00	8.70E-01
Raumbedarf	m ²	5.60E-04	3.70E-03

Tabelle Quantis, PSI, INFRAS.

6.4. Ergebnisse

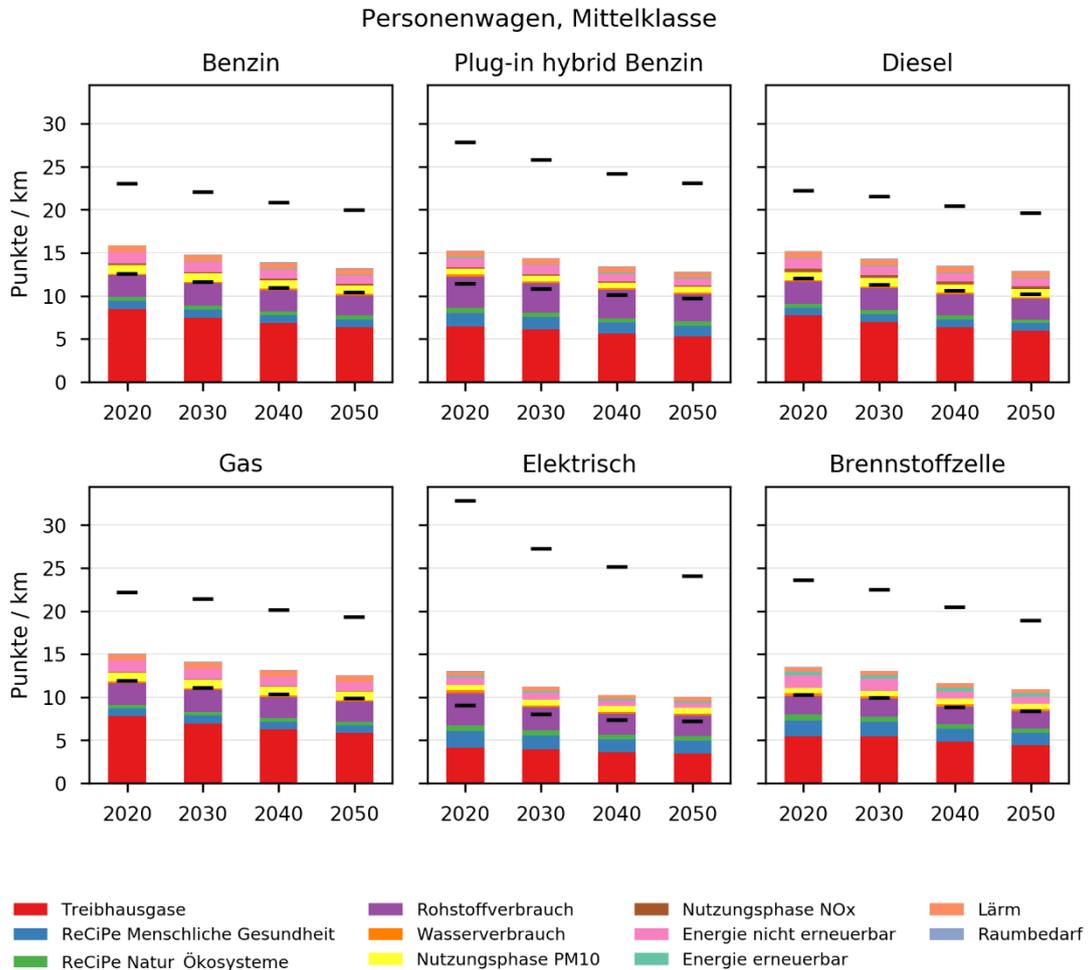
6.4.1. Lokale Perspektive

Die Ergebnisse der Gewichtung «lokal» zeigt generell eine grosse Bedeutung der Treibhausgasemissionen, der Luftschadstoffe in der Nutzungsphase (PM₁₀, je nach Fahrzeug auch NO_x) und des Lärms. Der Vergleich zwischen den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren und den elektrisch betriebenen Fahrzeugen zeigt einen deutlichen Unterschied der Treibhausgasemissionen und Lärmwerte. Bei den PM₁₀ Emissionen zeigt sich, dass ein wesentlicher Anteil durch den Reifenabrieb verursacht wird und deshalb dieser Luftschadstoff bei der elektrischen Variante immer noch einen relevanten Anteil hat. Die Resultate vom Raumbedarf hängen nur von der Fahrzeugkategorie und nicht vom Motortyp. Deshalb bleiben sie für alle Varianten gleich. Weiter fliesst der Parkraumbedarf nicht in die Berechnung des Raumbedarfs ein.

Insgesamt schneiden die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren und mit Brennstoffzellen schlechter ab als Batteriefahrzeuge.

Die Unsicherheit, die in den Ergebnissen dargestellt wird, berücksichtigt nur Schlüsselaspekte des Systems, aber keine methodologische Unsicherheit. Die wichtigsten Treiber der Unsicherheit sind die gefahrenen Kilometer während der Lebensdauer des Fahrzeugs sowie, für elektrische Fahrzeuge, die Lebensdauer und die Größe der Batterie. Für Vergleiche ist es wenig sinnvoll, «BestCase» Ergebnisse einer Antriebsart mit «WorstCase» Ergebnissen einer anderen Fahrzeugart zu vergleichen. Vielmehr soll diese Art der Unsicherheitsanalyse die Variabilität der Ergebnisse innerhalb einzelner Antriebsarten veranschaulichen.

Abbildung 23 Zürich Mobilitäts-Umweltindex (globale Perspektive) für einen Mittelklasse Personenwagen



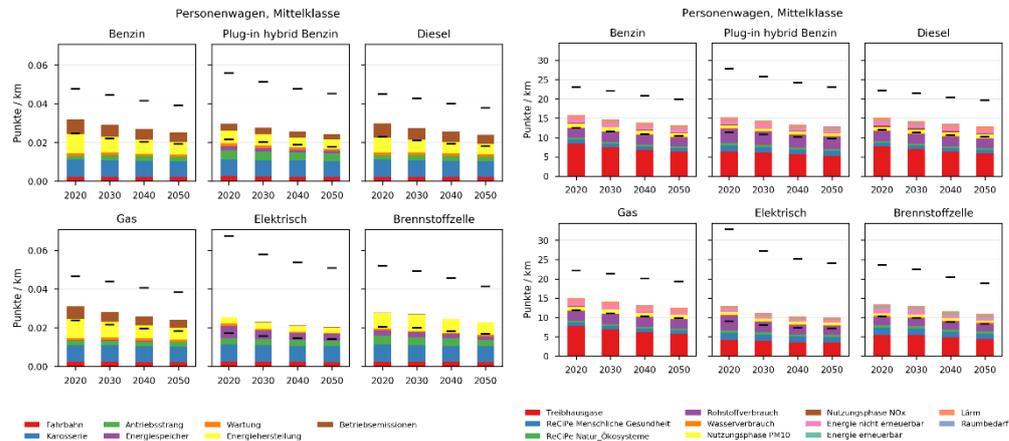
Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

6.4.3. Diskussion

Die zwei Perspektiven «lokal» und «global» zeigen eine ähnliche Tendenz in der Reihenfolge der Varianten, allerdings mit unterschiedlicher Ausprägung: die elektrischen Fahrzeuge schneiden besser ab als diejenigen mit Verbrennungsmotoren. Ergebnisse für Brennstoffzellenfahrzeuge sind in der gleichen Grössenordnung wie jene von Autos mit Verbrennungsmotoren. Bei der Bewertung «lokal» spielt der Lärm eine grosse Rolle, während die Treibhausgasemissionen für die Bewertung «global» den grössten Teil des Unterschieds ausmachen.

Die «globalen» Ergebnisse sind auch in Bezug auf die Rangfolge der verschiedenen Antriebstoppen den mit der LCIA Methode ReCiPe berechneten Resultaten sehr ähnlich.

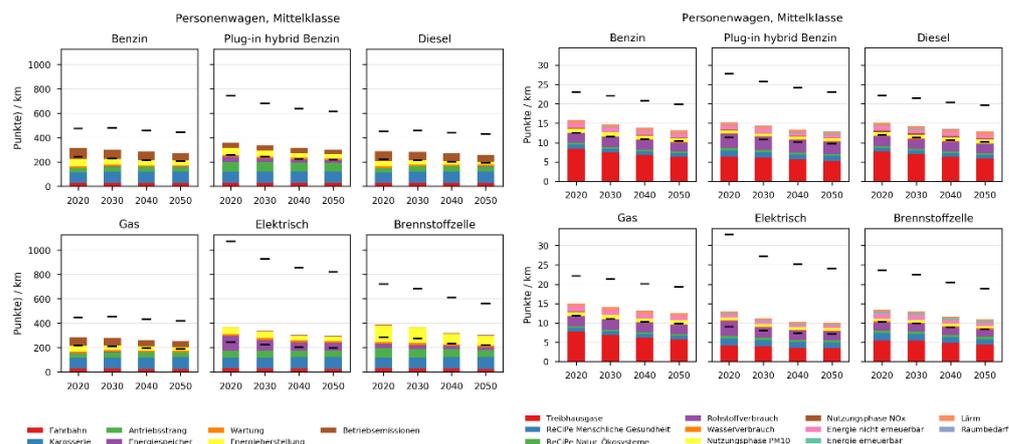
Abbildung 24 Gegenüberstellung der Resultate mit (links) ReCiPe (total), rechts: Zürich Mobilitäts-Umweltindex (globale Perspektive) für einen Mittelklasse Personenwagen



Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

Die «globalen» Ergebnisse unterscheiden sich aber von den Ergebnissen der Methode der ökologischen Knappheit, bei der die elektrischen Fahrzeuge und solche mit Brennstoffzellen tendenziell schlechter als diejenigen mit konventionellen Treibstoffen abschneiden. Die Unsicherheiten in der Bewertung mit der UBP-Methodik werden im Kapitel 5.1.11 aufgeführt.

Abbildung 25 Gegenüberstellung der Resultate mit (links) ökologische Knappheit (UBP), rechts: Zürich Mobilitäts-Umweltindex (globale Perspektive) für einen Mittelklasse Personenwagen



Grafik Quantis, PSI, INFRAS.

Mit dem ZMU-Index ist ein gesamter Vergleich der Alternativen aufgrund mehrerer Kriterien möglich, bei dem auch eine Priorisierung der Umweltbelastungen explizit gemacht wird. Durch die subjektiven Elemente dieser Bewertung erhält diese allerdings eine hohe Unsicherheit, die bei der schlussendlichen Entscheidung nicht ausgeblendet werden soll.

7. Fazit

Dieser Bericht dokumentiert die Analyse der Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext von Zürich im Zeitraum 2020-2050 sowie das zugehörige Excel-Tool, das entwickelt wurde, um Ökobilanzergebnisse und Gesamtbetriebskosten für verschiedene Fahrzeugtypen bereitzustellen. Der Hauptzweck dieses Berichts besteht darin, die wichtigsten methodischen Entscheidungen und die für die Ökobilanz relevanten Annahmen zu beschreiben. Weitere Informationen sind im Tool selbst zu finden; dies betrifft insbesondere das komplette Set an Parametern für die Fahrzeugdefinition und an Ergebnissen für sämtliche Fahrzeugtypen, welche in diesem Bericht nicht gezeigt sind.

Die Ergebnisse und ihre Interpretation werden in diesem Bericht am Beispiel von Personenwagen mittlerer Grösse diskutiert. Es zeigt sich, dass elektrisch angetriebene Fahrzeuge, insbesondere Batterieautos, dank ihrer höchsten Gesamtenergieeffizienz deutliche Reduktionen der Treibhausgasemissionen ermöglichen, sofern CO₂-armer Strom vorhanden ist. Für andere Umweltindikatoren sind diese Vorteile weniger stark ausgeprägt bzw. teilweise auch nicht gegeben. Die «Gesamtumweltbilanz» hängt dementsprechend stark davon ab, wie die einzelnen Indikatoren gegeneinander gewichtet werden. Für den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten «Zürich Mobilitäts-Umweltindex», welcher sämtliche Umweltauswirkungen mit einer Zürich-spezifischen Gewichtung zusammenfasst, ergeben sich generell vorteilhafte Ergebnisse für Batteriefahrzeuge und etwas weniger stark ausgeprägt auch für Brennstoffzellenfahrzeuge. Diese Umweltvorteile müssen heute bei einigen Fahrzeugtypen noch mit höheren Gesamtkosten erkaufte werden.

Im Allgemeinen sind die in diesen Ergebnissen gefundenen Trends auch für andere Fahrzeugtypen gültig, wenn auch mit einigen Abweichungen. Eine wichtige Quelle dieser Abweichungen hat mit der Gesamtstrecke zu tun, die während der Lebensdauer eines Fahrzeugs zurückgelegt wird. Beispielsweise schneiden E-Trottinette aufgrund ihrer geringen Lebensdauer im Allgemeinen recht schlecht ab. Umgekehrt schneiden Elektroantriebe für Stadtbusse im Vergleich zu ihren konventionellen Pendanten aufgrund der hohen Lebensdauer, die von Bussen zurückgelegt wird, sehr gut ab. Die zusätzlichen Produktionsbelastungen für diese Fahrzeuge verteilen sich auf viele Kilometer, sodass die ökologischen Vorteile während des Betriebs die Ergebnisse dominieren. Die Annahmen zur Lebensfahrleistung der Fahrzeuge sowie die Lebensdauer und die Größe der Batterie sind sehr entscheidend für die Resultate.

Ein weiterer Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse für verschiedene Fahrzeugtypen liegt darin, dass der Verbrennungsprozess für den typischen Betriebsfall bei einigen Fahrzeugen sehr ineffizient ist. Motorräder sind ein gutes Beispiel dafür: Deren Verbrennungsmotoren

sind auf ein optimales Verhältnis von Leistung und Gewicht ausgelegt und haben daher oft einen sehr schlechten Wirkungsgrad, sodass hier ein grosses Potenzial für Verbesserungen durch Elektrifizierung besteht. Elektro-Motorräder schneiden in fast allen Umweltwirkungskategorien weit besser ab als jene mit Verbrennungsmotoren. Ein weiteres Beispiel dafür sind Kehrichtsammelfahrzeuge. Da sie den grössten Teil ihrer Lebensdauer bei niedrigen Geschwindigkeiten betrieben werden, sind der Energieverbrauch und die Direktemissionen pro Kilometer bei Verbrennungsfahrzeugen sehr hoch, was diese Fahrzeuge zu ausgezeichneten Kandidaten für die Elektrifizierung macht.

Schliesslich haben einige Fahrzeugtypen, wie z.B. Traktoren, eine sehr lange zeitliche Lebensdauer, fahren aber relativ wenige Stunden pro Jahr. Dies bedeutet, dass die Batterien und Brennstoffzellen in diesen Traktoren wahrscheinlich aufgrund von Alterseffekten und nicht aufgrund von Ladezyklen bzw. betriebsbedingten Alterungseffekten ausgetauscht werden müssen. Dies bedeutet, dass Traktoren trotz der relativ geringen Anzahl von Betriebsstunden rechnerisch mehr als eine Ersatzbatterie oder -brennstoffzelle brauchen. Das Gegenteil ist der Fall bei stark ausgelasteten Fahrzeugen wie Bussen. Diese legen enorme Distanzen während der gesamten Lebensdauer zurück und die produktionsbedingt höheren Umweltbelastungen von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen werden – umweltfreundlicher Strom vorausgesetzt – im Betrieb der Fahrzeuge rasch kompensiert.

Bei vielen Indikatoren und Bewertungsmethoden sind die Unsicherheiten gross, was Entscheidungen erschwert. Dies betrifft vor allem Indikatoren, welche ortsspezifische Wirkungen aufweisen, wie beispielsweise Schadstoffemissionen und Wasserverbrauch, da eine räumlich hoch aufgelöste Analyse im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war. Auch die Ergebnisse bzgl. Rohstoffverbrauch müssen mit Vorsicht interpretiert werden, da keine zufriedenstellende Bewertungsmethode existiert.

Glossar

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

Literatur

- Althaus, H. J., & Gauch, M. (2010). Vergleichende Ökobilanz individueller Mobilität: Elektromobilität versus konventionelle Mobilität mit Bio-und fossilen Treibstoffen. *Technologie und Gesellschaft, Empa, Dübendorf*.
- Antonini, C., Treyer, K., Streb, A., Bauer, C. and Mazzotti, M. (2020). Hydrogen production from natural gas and biomethane with carbon capture and storage – A techno-environmental analysis, *Sustainable Energy Fuels*, doi: 10.1039/DoSE00222D
- Basner, M., McGuire, S. (2018). WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Effects on Sleep, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, doi: 10.3390/ijerph15030519
- Cox, B., Bauer, C., Beltran, A. M., van Vuuren, D. P., & Mutel, C. L. (2020). Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. *Applied Energy*, 269, 115021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626192030533X>
- Cox, B., Mutel, C.L., Bauer, B., Mendoza Beltran, A., and van Vuuren, D.P. (2018). Uncertain environmental footprint of current and future battery electric vehicles. *Environmental Science and Technology*, 52 (8), p. 4989–4995.
- Cox, B. and Mutel, C. (2018). The environmental and cost performance of current and future motorcycles. *Applied Energy*, 212: p. 1013-1024.
- Cox, B. and Bauer, C. (2018). Environmental assessment of current and future passenger vehicles in Switzerland: *Report for the Swiss Federal Office for Energy*. PSI.
- Cox, B. (2018). Mobility and the energy transition: a life cycle assessment of swiss passenger transport technologies including developments until 2050. *Diss. ETH Zurich*.
- Cox, B., A. Castillo, and Mutel, C. (2017). Environmental assessment of current and future urban buses with different energy sources. In *The 30th International Electric Vehicle Symposium & Exhibition*, Stuttgart, <http://papers.evs30.org/proceedings>.

- Dai, Q. et al. (2019). Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. Batteries, doi: 10.3390/batteries5020048.
- ecoinvent 3.6. Systemmodell «allocation, cut-off by classification», www.ecoinvent.org.
- ECOPLAN (2019). Auswirkungen des Verkehrslärms auf die Gesundheit : Berechnung von DALY für die Schweiz. Bern und Altdorf.
- EMEP (2019). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-pollution-sources-1/emep-eea-air-pollutant-emission-inventory-guidebook/emep>.
- ewz (2020). Elektrizitätswerk der Stadt Zürich: Referenzszenario für die zukünftige Entwicklung der Stromversorgung der Schweiz. Zur Verfügung gestellt von ewz, 8.4.2020.
- Fazio, S., et al. (2018). "Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods." *New Models and Differences with ILCD*, EUR 28888.
- Frischknecht, R., and Sybille Büsser Knöpfel (2013). Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit: Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. *BAFU*, 2013.
- Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, Schyver A De, Struijs J, Zelm R van. (2013). ReCiPe 2008. A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. 1.08. The Hague, The Netherlands.
- Goldie-Scot, L. (2019). "A behind the scenes take on lithium-ion battery prices." *Bloomberg New Energy Finance*. From: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>.
- Guinée, J. (2016). The Abiotic Depletion Potential: Background, Updates, and Future. Resources. <https://doi.org/10.3390/resources5010016>.
- HBEFA 4.1 (2019). Handbook of Emission Factors for Road Transport. <http://www.hbefa.net>.

Hirschberg, S., et al. (2016). Opportunities and challenges for electric mobility: an interdisciplinary assessment of passenger vehicles. PSI, EMPA, ETH.

INFRAS (2019). E-Bus-Strategie Verkehrsverbund Luzern. https://www.vvl.ch/files/7915/5957/2552/20190404_Bericht_E-Bus-Strategie-VVL_final.pdf.

INFRAS (2020). E-Bus-Strategie Verkehrsbetriebe St. Gallen.

Sacchi, R., Bauer, C., Cox, B. and Mutel, C. (2020, submitted) calculator: an open-source tool for prospective environmental and economic life cycle assessment of vehicles. When, Where and How can battery-electric vehicles help reduce greenhouse gas emissions? Submitted to Renewable and Sustainable Energy Reviews. In review.

Simons, A. and C. Bauer (2015). "A life-cycle perspective on automotive fuel cells." Simons A, Bauer C (2015) A life-cycle perspective on automotive fuel cells. *Applied Energy*, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.02.049.

Stadt Zürich (2020). Stromversorgung in einem «Netto-Null»-Szenario. Zur Verfügung gestellt von der Stadt Zürich, 13.5.2020.

Stocker T., Qin D., Plattner G., Tignor M., Allen S., Boschung J., et al. (2013). IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.

Tsiropoulos, I., D. Tarvydas, and N. Lebedeva (2018). "Li-ion Batteries for Mobility and Stationary Storage Applications Scenarios for Costs and Market Growth." *Publications Office of the European Union: Luxembourg*.

van der Giesen, C. et al. (2014). Energy and Climate Impacts of Producing Synthetic Hydrocarbon Fuels from CO₂. *Environmental Science and Technology*, doi: 10.1021/es500191g.

WHO (2011). Burden of disease from environmental noise, Quantification of healthy life years lost in Europe.

Zhang, X., Witte, J., Schilhauer, T. and Bauer, C. (2020). Life cycle assessment of power-to-gas with biogas as the carbon source. *Sustainable Energy & Fuels*. doi: 10.1039/C9SE00986H.

Zhang, X., Bauer, C., Mutel, C. and Volkart, K. (2017). Life Cycle Assessment of Power-to-Gas: Approaches, system variations and their environmental implications, *Applied Energy*, Vol. 190, pp. 326–338, doi:10.1016/j.apenergy.2016.12.098.

Anhang 1. Annahmen zu Mittelklasse Personenwagen: Allgemein

Antriebsart	Jahr	Unsicherheit	Lebensfahrleistung (km/Std)	Batterie Energiespeicher (kWh)	Energieverbrauch (kWh/km)	Elektrische Reichweite (km)	Wartungskosten (CHF/km)	Gesamtkosten (CHF/km)
Benzin	2020	Basis	180000		0.56		0.12	0.41
Benzin	2020	BestCase	270000		0.45		0.10	0.20
Benzin	2020	WorstCase	90000		0.68		0.14	1.05
Benzin	2050	Basis	180000	1.2	0.36		0.12	0.38
Benzin	2050	BestCase	270000	1.0	0.29		0.10	0.17
Benzin	2050	WorstCase	90000	1.5	0.43		0.14	1.00
Plug-in hybrid Benzin	2020	Basis	180000	15.0	0.39	103	0.13	0.45
Plug-in hybrid Benzin	2020	BestCase	270000	12.0	0.31	103	0.10	0.21
Plug-in hybrid Benzin	2020	WorstCase	90000	18.0	0.47	103	0.16	1.22
Plug-in hybrid Benzin	2050	Basis	180000	20.0	0.29	173	0.13	0.41
Plug-in hybrid Benzin	2050	BestCase	270000	16.0	0.23	173	0.10	0.19
Plug-in hybrid Benzin	2050	WorstCase	90000	24.0	0.34	173	0.16	1.11
Diesel	2020	Basis	180000		0.55		0.12	0.44
Diesel	2020	BestCase	270000		0.44		0.10	0.21
Diesel	2020	WorstCase	90000		0.66		0.14	1.11
Diesel	2050	Basis	180000	1.2	0.36		0.12	0.40
Diesel	2050	BestCase	270000	1.0	0.29		0.10	0.18
Diesel	2050	WorstCase	90000	1.5	0.43		0.14	1.05
Gas	2020	Basis	180000		0.63		0.12	0.45
Gas	2020	BestCase	270000		0.51		0.10	0.22
Gas	2020	WorstCase	90000		0.76		0.14	1.15
Gas	2050	Basis	180000	1.2	0.39		0.12	0.41
Gas	2050	BestCase	270000	1.0	0.31		0.10	0.19
Gas	2050	WorstCase	90000	1.5	0.47		0.14	1.08
Elektrisch	2020	Basis	180000	45.0	0.22	165	0.12	0.43
Elektrisch	2020	BestCase	270000	36.0	0.17	165	0.10	0.19
Elektrisch	2020	WorstCase	90000	54.0	0.26	165	0.14	1.36
Elektrisch	2050	Basis	180000	59.9	0.22	219	0.12	0.40
Elektrisch	2050	BestCase	270000	47.9	0.17	219	0.10	0.18
Elektrisch	2050	WorstCase	90000	71.9	0.26	219	0.14	1.15
Brennstoffzelle	2020	Basis	180000	5.0	0.32		0.15	0.62
Brennstoffzelle	2020	BestCase	270000	4.0	0.26		0.12	0.29
Brennstoffzelle	2020	WorstCase	90000	6.0	0.39		0.18	1.81
Brennstoffzelle	2050	Basis	180000	6.7	0.28		0.12	0.46
Brennstoffzelle	2050	BestCase	270000	5.3	0.22		0.10	0.22
Brennstoffzelle	2050	WorstCase	90000	8.0	0.33		0.14	1.22

Anhang 2. Annahmen zu Mittelklasse Personenwagen: Massen (kg)

Antriebsart	Jahr	Unsicherheit	Total	Karosserie	Antriebsstrang (mechanische Teile)	Antriebs- strang (elekt- rische Teile)	Brennstoff- zelle Ancillary BOP	Brennstoff- zelle Essential BOP	Brennstoff- zelle Stack	Batterie- zellen	Batterie BoP	Wasser- stofftank	Treibstoff- tank
Benzin	2020	Basis	1465	1170	271	0	0	0	0	0	0	0	24
Benzin	2020	BestCase	1465	1170	271	0	0	0	0	0	0	0	24
Benzin	2020	WorstCase	1465	1170	271	0	0	0	0	0	0	0	24
Benzin	2050	Basis	1298	1024	232	20	0	0	0	3	1	0	18
Benzin	2050	BestCase	1297	1024	232	20	0	0	0	2	1	0	18
Benzin	2050	WorstCase	1300	1024	232	20	0	0	0	4	2	0	18
Plug-in hybrid Benzin	2020	Basis	1699	1170	293	111	0	0	0	75	50	0	0
Plug-in hybrid Benzin	2020	BestCase	1665	1170	293	111	0	0	0	55	36	0	0
Plug-in hybrid Benzin	2020	WorstCase	1741	1170	293	111	0	0	0	100	67	0	0
Plug-in hybrid Benzin	2050	Basis	1439	1024	251	95	0	0	0	44	24	0	0
Plug-in hybrid Benzin	2050	BestCase	1420	1024	251	95	0	0	0	32	17	0	0
Plug-in hybrid Benzin	2050	WorstCase	1476	1024	251	95	0	0	0	68	37	0	0
Diesel	2020	Basis	1482	1170	287	0	0	0	0	0	0	0	25
Diesel	2020	BestCase	1482	1170	287	0	0	0	0	0	0	0	25
Diesel	2020	WorstCase	1482	1170	287	0	0	0	0	0	0	0	25
Diesel	2050	Basis	1313	1024	246	20	0	0	0	3	1	0	18
Diesel	2050	BestCase	1311	1024	246	20	0	0	0	2	1	0	18
Diesel	2050	WorstCase	1315	1024	246	20	0	0	0	4	2	0	18
Gas	2020	Basis	1499	1170	271	0	0	0	0	0	0	0	58
Gas	2020	BestCase	1499	1170	271	0	0	0	0	0	0	0	58
Gas	2020	WorstCase	1499	1170	271	0	0	0	0	0	0	0	58
Gas	2050	Basis	1323	1024	232	20	0	0	0	3	1	0	43
Gas	2050	BestCase	1322	1024	232	20	0	0	0	2	1	0	43
Gas	2050	WorstCase	1325	1024	232	20	0	0	0	4	2	0	43
Elektrisch	2020	Basis	1752	1170	92	115	0	0	0	225	150	0	0
Elektrisch	2020	BestCase	1650	1170	92	115	0	0	0	164	109	0	0
Elektrisch	2020	WorstCase	1877	1170	92	115	0	0	0	300	200	0	0
Elektrisch	2050	Basis	1406	1024	79	99	0	0	0	133	72	0	0
Elektrisch	2050	BestCase	1349	1024	79	99	0	0	0	96	52	0	0
Elektrisch	2050	WorstCase	1518	1024	79	99	0	0	0	205	111	0	0
Brennstoffzelle	2020	Basis	1670	1170	89	105	36	90	41	25	17	98	0
Brennstoffzelle	2020	BestCase	1659	1170	89	105	36	90	41	18	12	98	0
Brennstoffzelle	2020	WorstCase	1684	1170	89	105	36	90	41	33	22	98	0
Brennstoffzelle	2050	Basis	1361	1024	76	90	18	42	24	15	8	63	0
Brennstoffzelle	2050	BestCase	1354	1024	76	90	18	42	24	11	6	63	0
Brennstoffzelle	2050	WorstCase	1373	1024	76	90	18	42	24	23	12	63	0

Anhang 3. Annahmen zu Mittelklasse Personenwagen: Kosten (CHF)

Antriebsart	Jahr	Unsicherheit	Total	Karosserie	Antriebsstrang	Brennstoffzelle	Batterie	Wasserstofftank	Treibstofftank
Benzin	2020	Basis	36484	31000	5400	0	0	0	84
Benzin	2020	BestCase	15484	10000	5400	0	0	0	84
Benzin	2020	WorstCase	55484	50000	5400	0	0	0	84
Benzin	2050	Basis	36091	31000	4928	0	102	0	61
Benzin	2050	BestCase	15051	10000	4928	0	61	0	61
Benzin	2050	WorstCase	55136	50000	4928	0	146	0	61
Plug-in hybrid Benzin	2020	Basis	44100	31000	9350	0	3750	0	0
Plug-in hybrid Benzin	2020	BestCase	21568	10000	9350	0	2218	0	0
Plug-in hybrid Benzin	2020	WorstCase	64750	50000	9350	0	5400	0	0
Plug-in hybrid Benzin	2050	Basis	41211	31000	8533	0	1677	0	0
Plug-in hybrid Benzin	2050	BestCase	19540	10000	8533	0	1006	0	0
Plug-in hybrid Benzin	2050	WorstCase	60948	50000	8533	0	2415	0	0
Diesel	2020	Basis	41084	31000	10000	0	0	0	84
Diesel	2020	BestCase	20084	10000	10000	0	0	0	84
Diesel	2020	WorstCase	60084	50000	10000	0	0	0	84
Diesel	2050	Basis	40290	31000	9127	0	102	0	61
Diesel	2050	BestCase	19249	10000	9127	0	61	0	61
Diesel	2050	WorstCase	59334	50000	9127	0	146	0	61
Gas	2020	Basis	42460	31000	11000	0	0	0	460
Gas	2020	BestCase	21460	10000	11000	0	0	0	460
Gas	2020	WorstCase	61460	50000	11000	0	0	0	460
Gas	2050	Basis	41476	31000	10039	0	102	0	335
Gas	2050	BestCase	20436	10000	10039	0	61	0	335
Gas	2050	WorstCase	60521	50000	10039	0	146	0	335
Elektrisch	2020	Basis	46950	31000	4700	0	11250	0	0
Elektrisch	2020	BestCase	21353	10000	4700	0	6653	0	0
Elektrisch	2020	WorstCase	70900	50000	4700	0	16200	0	0
Elektrisch	2050	Basis	40061	31000	4030	0	5031	0	0
Elektrisch	2050	BestCase	17048	10000	4030	0	3019	0	0
Elektrisch	2050	WorstCase	61275	50000	4030	0	7245	0	0
Brennstoffzelle	2020	Basis	62350	31000	4700	19800	1250	5600	0
Brennstoffzelle	2020	BestCase	35759	10000	4700	15840	739	4480	0
Brennstoffzelle	2020	WorstCase	86980	50000	4700	23760	1800	6720	0
Brennstoffzelle	2050	Basis	41781	31000	4030	4032	559	2161	0
Brennstoffzelle	2050	BestCase	19319	10000	4030	3226	335	1728	0
Brennstoffzelle	2050	WorstCase	62266	50000	4030	4838	805	2593	0

Anhang 4. Annahmen zu Mittelklasse Personenwagen: Unsichere Parameter

Antriebsart	Jahr	Unsicherheit	Lebensfahr- leistung (km)	Karosseriekos- ten (CHF)	Kosten Brenn- stoffzelle (CHF)	Anzahl Ersatz- Brennstoffzel- lenstacks	Kosten Batte- rie (CHF)	Anzahl Ersatz- batterie	Energiever- brauchten (CHF/kWh)	Treibstoffkos- ten (CHF/km)	Wartungskos- ten (CHF/km)	Zinssatz für Amortisation
Benzin	2020	Basis	180000	31000	0	0.0	0	0.00	0.56	0.18	0.12	0.05
Benzin	2020	BestCase	270000	10000	0	0.0	0	0.00	0.45	0.14	0.10	0.03
Benzin	2020	WorstCase	90000	50000	0	0.0	0	0.00	0.68	0.22	0.14	0.07
Benzin	2050	Basis	180000	31000	0	0.0	102	0.00	0.36	0.18	0.12	0.05
Benzin	2050	BestCase	270000	10000	0	0.0	61	0.00	0.29	0.14	0.10	0.03
Benzin	2050	WorstCase	90000	50000	0	0.0	146	1.00	0.43	0.22	0.14	0.07
Plug-in hybrid Benzin	2020	Basis	180000	31000	0	0.0	3750	0.00	0.39	0.18	0.13	0.05
Plug-in hybrid Benzin	2020	BestCase	270000	10000	0	0.0	2218	0.00	0.31	0.14	0.10	0.03
Plug-in hybrid Benzin	2020	WorstCase	90000	50000	0	0.0	5400	1.00	0.47	0.22	0.16	0.07
Plug-in hybrid Benzin	2050	Basis	180000	31000	0	0.0	1677	0.00	0.29	0.18	0.13	0.05
Plug-in hybrid Benzin	2050	BestCase	270000	10000	0	0.0	1006	0.00	0.23	0.14	0.10	0.03
Plug-in hybrid Benzin	2050	WorstCase	90000	50000	0	0.0	2415	1.00	0.34	0.22	0.16	0.07
Diesel	2020	Basis	180000	31000	0	0.0	0	0.00	0.55	0.18	0.12	0.05
Diesel	2020	BestCase	270000	10000	0	0.0	0	0.00	0.44	0.14	0.10	0.03
Diesel	2020	WorstCase	90000	50000	0	0.0	0	0.00	0.66	0.22	0.14	0.07
Diesel	2050	Basis	180000	31000	0	0.0	102	0.00	0.36	0.18	0.12	0.05
Diesel	2050	BestCase	270000	10000	0	0.0	61	0.00	0.29	0.14	0.10	0.03
Diesel	2050	WorstCase	90000	50000	0	0.0	146	1.00	0.43	0.22	0.14	0.07
Gas	2020	Basis	180000	31000	0	0.0	0	0.00	0.63	0.18	0.12	0.05
Gas	2020	BestCase	270000	10000	0	0.0	0	0.00	0.51	0.14	0.10	0.03
Gas	2020	WorstCase	90000	50000	0	0.0	0	0.00	0.76	0.21	0.14	0.07
Gas	2050	Basis	180000	31000	0	0.0	102	0.00	0.39	0.18	0.12	0.05
Gas	2050	BestCase	270000	10000	0	0.0	61	0.00	0.31	0.14	0.10	0.03
Gas	2050	WorstCase	90000	50000	0	0.0	146	1.00	0.47	0.21	0.14	0.07
Elektrisch	2020	Basis	180000	31000	0	0.0	11250	0.00	0.22	0.00	0.12	0.05
Elektrisch	2020	BestCase	270000	10000	0	0.0	6653	0.00	0.17	0.00	0.10	0.03
Elektrisch	2020	WorstCase	90000	50000	0	0.0	16200	1.00	0.26	0.00	0.14	0.07
Elektrisch	2050	Basis	180000	31000	0	0.0	5031	0.00	0.22	0.00	0.12	0.05
Elektrisch	2050	BestCase	270000	10000	0	0.0	3019	0.00	0.17	0.00	0.10	0.03
Elektrisch	2050	WorstCase	90000	50000	0	0.0	7245	1.00	0.26	0.00	0.14	0.07
Brennstoffzelle	2020	Basis	180000	31000	19800	0.0	1250	0.00	0.32	0.43	0.15	0.05
Brennstoffzelle	2020	BestCase	270000	10000	15840	0.0	739	0.00	0.26	0.34	0.12	0.03
Brennstoffzelle	2020	WorstCase	90000	50000	23760	1.0	1800	1.00	0.39	0.52	0.18	0.07
Brennstoffzelle	2050	Basis	180000	31000	4032	0.0	559	0.00	0.28	0.43	0.12	0.05
Brennstoffzelle	2050	BestCase	270000	10000	3225.6	0.0	335	0.00	0.22	0.34	0.10	0.03
Brennstoffzelle	2050	WorstCase	90000	50000	4838.4	1.0	805	1.00	0.33	0.52	0.14	0.07

Anhang 5. Review-Report ZHAW



School of
Engineering

INE Institut für
Nachhaltige Entwicklung

Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext

Kritische Überprüfung nach ISO 14'044

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW)
Institut für Nachhaltige Entwicklung (INE)
29.06.2020

Dr. Andrea Del Duce
Technikumstrasse 9
Postfach, 8401 Winterthur
Tel. direkt: 058 934 49 74
E-Mail: andrea.delduce@zhaw.ch

Corinna Baumgartner
Technoparkstrasse 2
Postfach, 8401 Winterthur
Tel. direkt: 058 934 70 84
E-Mail: corinna.baumgartner@zhaw.ch

1 Einführung

Dieses Dokument fasst das kritische Review der Studie "*Umweltauswirkungen von Fahrzeugen im urbanen Kontext*" beauftragt vom Umwelt- und Gesundheitsschutz und dem Tiefbauamt der Stadt Zürich sowie dem Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich. Die Studie wurde von einem aus Forschungsinstitutionen und Beratungsunternehmen bestehenden Konsortium durchgeführt: INFRAS, Paul Scherrer Institut PSI und Quantis.

2 Reviewprozess

Die finalen Dokumente bestehen aus einem Schlussbericht und dem dazugehörigen Excel-Tool. Beide Dokumente wurden für den Reviewprozess berücksichtigt.

Entsprechend ISO/TS 14071:2014 und 14'044:2006 ist das Ziel dieses Reviews zu verifizieren, dass:

- die Methoden, mit denen die Ökobilanz durchgeführt wurde, mit ISO 14044:2006 konsistent sind;
- die Methoden, mit denen die Ökobilanz durchgeführt wurde, wissenschaftlich und technisch valid sind;
- die verwendeten Daten in Bezug auf das Ziel der Studie angemessen und sinnvoll sind;
- die Interpretationen und identifizierten Grenzen in Bezug auf das Ziel der Studie; und
- der Bericht der Studie transparent und konsistent ist.

Das Review wurde von zwei Reviewern (Dr. Andrea Del Duce und Corinna Baumgartner) als begleitendes Review durchgeführt. Die Reviewer nahmen an folgenden Veranstaltungen im Rahmen der Studie teil an:

- dem Workshop Züri-UBP (06.02.2020);
- der Vorstellung der wichtigsten Punkte zu den Rahmenbedingungen und der Fahrzeugdefinition in einem direkten Austausch mit Dr. Brian Cox am 18.2.2020.
- der Vorstellung der ersten Resultate am 25.3.2020

Und sie gaben Feedback und Kommentare zu:

- der ersten Version des Schlussberichts (19.06.2020)
- der finalen Version des Schlussberichts nach Anpassungen.

3 Resultate des Reviewprozesses

Allgemein reflektiert die Studie den aktuellen Stand des Wissens und folgt den methodischen Vorgaben der relevanten Normen (ISO 14'044) und Datengrundlage und Methodik werden insgesamt und soweit ersichtlich als passend für die Ziele und Rahmenbedingungen der Studie eingeschätzt. In den folgenden Abschnitten werden generelle Hinweise zur Studie zusammengefasst. In Kapitel 4 werden Kommentare zu spezifischen Aussagen im Schlussbericht der Studie aufgeführt. Das kritische Review enthält keine umfassende Überprüfung der Sachbilanz und deren Modellierung, da nicht alle Daten in den vorhandenen Dokumenten vorliegen.

3.1 Konsistenz mit ISO 14044:2006

Die Studie basiert auf den ISO 14040, 14044 und 14025 Normen. Die vier Phasen und die Durchführung der Studie entsprechen diesen Normen. Dies bezieht sich nicht auf den Zürich-Mobilitäts-Umweltindex (ZMU). Dieser wurde vom kritischen Review ausgeschlossen.

Die Ziele der Studie wurden ausführlich dokumentiert, auch die funktionelle Einheit, Systemgrenzen und Allokationsansatz wurden im Rahmen des Umfangs der Studie adäquat gewählt und transparent dokumentiert. Es wurde ebenfalls auf Grenzen im Zusammenhang mit diesen für die Interpretation transparent hingewiesen.

3.2 Methoden für die Durchführung der Ökobilanz

Die Methoden resp. Indikatoren für die Wirkungsabschätzung wurden einzeln aus verschiedenen methodischen Ansätzen kombiniert. Diese stellen Umweltaspekte dar, die für den Auftraggeber von speziellem Interesse sind und wurden von diesem so gewünscht.

Ein Grossteil der Modellierungsmethoden wurde von früheren Studien eines der Mitautoren übernommen und wurde daher entsprechend mit Literaturverweisen dokumentiert. Diese Studien sind wissenschaftlich (inkl. peer review) publiziert und wurden keinem erneuten Reviewprozess unterzogen.

Einzelne Methoden finden jedoch Erwähnung, wie die Szenarien-Analyse für Zukunftshorizonte; diese basiert grösstenteils auf Schätzungen und Annahmen der Autoren.

3.3 Daten in Relation zum Ziel der Studie

Die verwendeten Daten entsprechen soweit ersichtlich dem Ziel der Studie. Auch die Datenqualität wird explizit erwähnt und abgegrenzt. Einzelne Datenquellen sind jedoch nicht direkt aus dem Bericht oder dem Excel-Tool ersichtlich, werden jedoch, wie bei wissenschaftlichen Arbeiten üblich, mit Literaturverweisen indirekt dokumentiert.

3.4 Interpretation und Grenzen in Relation zum Ziel der Studie

Die Studie zeigt Ergebnisse in hoher Bandbreite bezüglich zukünftiger Entwicklungen entsprechend den gewählten Zeithorizonten. Diese Streuung ist explizit sowie transparent erwähnt und erläutert. Dennoch bleibt ein gewisser Interpretationsspielraum vorhanden, mit dem für künftige Anwendungen und Analysen z.B. des Exceltools sensibel und verantwortungsbewusst umgegangen werden muss, um zu validen Resultaten zu gelangen.

Des Weiteren wird darauf verwiesen, dass Fahrzeugkategorien nicht untereinander verglichen werden können, da Kapazitäten und Personenanzahl nicht in die Studie eingeflossen sind. Dies ist für künftige Entscheidungsträger und Nutzer der Resultate explizit zu beachten.

3.5 Transparenz und Konsistenz des Schlussberichts

Der Schlussbericht der Studie umfasst, wie vom Auftraggeber gewünscht, vorwiegend Daten und Ergebnisse für eine Beispiel-Fahrzeugkategorie: mittlere Personenwagen. Es werden im Bericht auch Schlussfolgerungen zu anderen Fahrzeugkategorien vorgestellt, zu denen jedoch Datengrundlage und Ergebnisse nicht diskutiert werden. Insofern ist der Bericht alleine nicht ausreichend, da nur im Excel-Tool alle relevanten Daten, Annahmen und Quellen für alle Fahrzeugkategorien dokumentiert sind. Kombiniert bilden beide Dokumente eine überwiegend transparente und konsistente Dokumentation der Studie.

Durch alleinigen Verweis auf Literaturquellen bei Modellierungsmethoden ist jedoch die Verständlichkeit nicht immer gegeben. Dies gilt es zu berücksichtigen bei Veröffentlichung der Studie für ein breiteres Publikum.

Des Weiteren gilt zu erwähnen, dass aus Schlussbericht und Excel-Tool nicht alle zu Grunde liegenden Daten und verwendeten Datensätze ersichtlich sind. Dies führt zu leichten Einschränkungen bezüglich Transparenz.

4 Liste spezifischer Kommentare zu Aussagen im Schlussbericht

Die hier aufgeführten Kommentare wurden von den Reviewern dem ersten Entwurf des Schlussberichts hinzugefügt. Antworten der Durchführenden wurden mit dem finalen Schlussbericht gegeben. Kursiv markierte Punkte wurden, soweit ersichtlich, nicht oder noch nicht in der den Reviewern vorliegenden Version ergänzt.

Initialen	Index	Kapitel	Element	Art Kommentar ¹	Kommentar / Empfehlung Reviewer	Antwort Durchführende
AD ²	1	1.		ed	Bitte noch erwähnen, dass während im gesamten Projekt alle diese Fahrzeuge betrachtet wurden, der Fokus in diesem Bericht auf Personenwagen liegt.	HA ³ : Entsprechender Textblock im Bericht nach vorne verschoben und leicht ergänzt.
AD	2	1.		ed	Die Autoren schreiben «Die Entwicklung bis 2050 hängt stark davon ab, wie sich die Energie- und Treibstoffpreise entwickeln werden». Der Punkt ist grundsätzliche nachvollziehbar, es ist unklar, wo dieser im Bericht diskutiert wird.	BC ⁴ : Kap. 4.2
AD	3	1.		ed	Obwohl der Fokus des Berichtes (bezüglich Ergebnisse und Datengrundlage) auf mittlere Personenwagen liegt, adressieren die Autoren in der Zusammenfassung auch Busse und Lastwagen. Der Leser hat keine Daten und Ergebnisse, um diese Aussagen nachzuvollziehen. Es sollte noch ein Kapitel eingeführt werden, in dem ausgewählte Er-	BC: Daten und Ergebnisse sind im Excel zu finden, das einen integralen Bestandteil der Dokumentation darstellt. Text angepasst mit Hinweis darauf.

¹ Generell (ge), Editoriell (ed), Technisch (te)

² AD: Andrea Del Duce

³ HA: Hans-Jörg Althaus

⁴ BC: Brian Cox

					gebnisse diskutiert werden (mit der wichtigsten Datengrundlage dahinter), die diese Aussagen stützen.	
AD	4	1.		te	Die Autoren schreiben «Bei Lastwagen weist die Batterie in batterieelektrischen Fahrzeugen einen hohen Einfluss auf die Ökobilanzergebnisse auf: Um bei hoher Transportlast praxistaugliche Reichweiten zu ermöglichen, müssen Batterien entsprechend gross dimensioniert werden und dies macht sich in den Ökobilanzergebnissen negativ bemerkbar». Hier können aber unterschiedliche Situationen existieren: für die Verteilung in der Stadt, mit Zwischenladung der Batterie, kann die Batteriegrösse reduziert werden. Wichtig ist das Berücksichtigen von Ladestrategien. Für längere Strecken ist die Reichweite tatsächlich eine Herausforderung. Das sollte aber für einen städtischen Fokus weniger ein Problem sein.	HA: Das «Zwischenladungskonzept» ist für Lkw auch nicht einfach. Die Ladezeiten sind selbst mit hoher Leistung noch so lange, dass man entweder ein zweites Fahrzeug braucht oder dass der Fahrer 2 Stunden am Tag am Kaffee trinken ist. beides ist ökonomisch nicht optimal. BC: Im Excel Tool kann die Batteriegrösse angepasst werden, um deren Einfluss auf die Ergebnisse zu sehen.
CB⁵	5	2.	Abb. 1	ed	Das «critical review» schliesst auch einen Abgleich mit «goal & scope» ein.	HA: angepasst
AD	6	2.1		ed	Bitte noch Informationen zum geographischen und technologischen Scope hinzufügen: -Wo wird angenommen, dass die Fahrzeuge/Komponente produziert werden? -Welche Strommixe werden dafür angenommen (im Tool wird ein Global und ein EU Mix erwähnt – bitte diese Strommixe beschreiben).	HA: angepasst BC: Siehe Excel Tool, Arbeitsblatt «LCIA» und angepasste Text in Kap. 3.

⁵ CB: Corinna Baumgartner

AD		2.1		ge	Die Autoren schreiben «Vergleiche über verschiedene Fahrzeugtypen und Grössen müssen mit Vorsicht gemacht werden, da die funktionellen Einheiten nicht unbedingt vergleichbar sind. Bei Vergleichen zwischen den Fahrzeugtypen ist zusätzlich die Transportleistung (Personen und Güter) zu berücksichtigen.». Ein direkter Vergleich ist somit schwierig. Das weist darauf hin, dass das Tool gewisse Vorkenntnisse braucht, um richtig benutzt zu werden. Die Rahmenbedingungen zur Vergleichbarkeit sollten expliziter (hier oder woanders) diskutiert werden.	BC: So gewünscht vom Auftraggeber.
AD		2.1		ed	Das Konzept nachdem die funktionelle Einheit im Projekt definiert wird, wird beschrieben und ist nachvollziehbar. Die spezifischen funktionellen Einheiten werden aber nicht explizit erwähnt. Bitte als Beispiel zumindest für den mittleren Personenwagen die funktionelle Einheit erwähnen.	BC: Text angepasst
AD		2.1		ed	Ich konnte die hellblau markierten Parameter im Excel Tool nicht finden. Könnte das an der Version des Tools liegen? Bitte sicherstellen, dass in der finalen Version des Tools es auch so ist.	BC: Text angepasst.
AD		2.1		ge	Ein direkter Vergleich ist somit schwierig. Das weist darauf hin, dass das Tool gewisse Vorkenntnisse braucht, um richtig benutzt zu werden. Die Rahmenbedingungen zur Vergleichbarkeit sollten expliziter (hier oder woanders) diskutiert werden.	BC: So gewünscht vom Auftraggeber.
AD		2.1.2.	Tab. 3	ed	Hier sollte schon angedeutet werden (z.B. mit einer weiteren Fussnote), woher die Stromszenarien der Zukunft kommen und	BC: Text angepasst.

					auf das entsprechende Kapitel im Bericht verwiesen werden.	
CB		2.2		ed	Wo ist ersichtlich bei welchem Fahrzeugtyp auf welche Daten (ecoinvent/INFRAS/PSI) zurückgegriffen wurde?	HA: Im Excel «Fahrzeugdefinition.xlsx», Arbeitsblatt «LCIA»
CB		2.2		ed	Die Autoren schreiben «Die Daten basieren auf ecoinvent v3.6 bzw. auf Daten des PSI/INFRAS für fahrzeugspezifische Datensätze, die nicht bzw. in nicht ausreichender Qualität in ecoinvent vorkommen.». Was bedeutet ausreichende Qualität? Nach welchen Kriterien wurde ausgewählt?	BC: Text angepasst
CB		2.2		te	Die Autoren schreiben «Das Vordergrundsystem (Siehe Abb. 2) wird für die Zukunft angepasst, um die Entwicklung der Fahrzeuge zu berücksichtigen (z.B. bzgl. Masse, Effizienz, Lebensdauer von wichtigen Komponenten). Im Allgemeinen wird mit dem heutigen Hintergrundsystem gerechnet. Das Erstellen und Verwenden von prospektiven Versionen der ecoinvent-Hintergrunddaten und der Treibstoffversorgungsketten wäre weit über den Rahmen dieses Projekts hinausgegangen. Ein spezieller Fokus wird jedoch auf die Entwicklung von Batterien (Kap. 3.2.3) gelegt, da die Umweltbelastungen aus deren Herstellung einen substantziellen Beitrag zum ökologischen Fussabdruck von Fahrzeugen ausmachen können (Cox et al. 2018; Cox & Bauer 2018).». Dies sollte bei der Diskussion der Resultate explizit bedacht und diskutiert werden, falls nur bei der Batterie eine Entwicklung angenommen wurde und bei anderen Antriebsarten nicht.	BC und HA: Es wird für (fast) alle Parameter eine Entwicklung angenommen. Diese passiert meistens im Vordergrund System (im Excel) während das Hintergrund System konstant gehalten werden kann. Für Batterien sind die Anpassungen (Energie Quellen und Mengen) im Hintergrund gemacht worden, da Excel dafür nicht geeignet wäre. Entwicklungen bei Brennstoffen und Leichtbau sind beide berücksichtigt.

					Zusätzliche Anmerkung von AD : Spielen solche Aspekte bei der Brennstoffzelle auch nicht eine Rolle? Und wurden Leichtbauaspekte berücksichtigt?	
CB		2.2		te	Die Autoren schreiben «Die Entsorgung von Fahrzeugen und Fahrwegen wird nach dem so genannten «cut-off-Prinzip» modelliert. »Warum wurde dieser Allokationsansatz gewählt?	HA: Weil eine attributive Betrachtung gemacht werden soll. Eine Marginale Betrachtung ist so generisch nicht möglich / sinnvoll. Es wären zum Beispiel unterschiedliche Studien mit unterschiedlichen Ergebnissen, wenn man fragt: <ul style="list-style-type: none"> • Was passiert (umweltlich) wenn die Stadt Zürich ihre Flotte umstellt auf BEV? • Was passiert (umweltlich) wenn der Kanton Zürich BEV massiv fördert.
AD		2.3	Tab. 4	te	Es sind zum Teil sehr spezifische Indikatoren, auch welche, die nicht in allen LCAs so berücksichtigt werden. Bitte noch hinzufügen, wie diese Liste entstanden ist (Workshop? Vom Auftraggeber gegeben?)	BC: Vom Auftraggeber.
AD		2.3	Rohstoffverbrauch		Die Autoren schreiben «Entsprechend wird hier ein Indikator verwendet, der nicht zur Modellierung passt und die Resultate sind entsprechend nicht valide». Obwohl: in einer Zukunftsperspektive, in welcher generell ein wachsender Automobilmarkt erwartet werden kann, gibt auch dieser Indikator wichtige Hinweise, über potentielle Herausforderungen.	HA: Für die künftigen Herausforderungen schaut man besser auf verbaute Materialien im Vordergrundsystem. Indikator wurde so verlangt, vermutlich weil sehr viele LCA diesen Indikator nutzen.

					Auch ist nicht wirklich nachvollziehbar, warum dieser Indikator analysiert wurde, wenn dieser im Kontext nicht valide ist.	
AD		2.3	<i>Raumbedarf</i>	<i>ed</i>	Bitte Referenz/Link zur Webseite einfügen.	PH ⁶ : Referenz und Webseite sind im Text und in Fussnote 4 ergänzt (www.zukunft-mobilitaet.net)
AD		2.3		<i>ed</i>	Bitte Referenzen / Links zu Webseiten einfügen.	PH: Tabelle mit Annahmen zu Geschwindigkeiten ist ergänzt (Tabelle 5)
AD		2.3	<i>Lärm</i>	<i>ed</i>	Die Autoren schreiben «Die Werte DALY/km wurden durch den Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ) aus den Parametern Lärmwert (Leq) pro Fahrzeugtyp, Fahrleistung und DALY hergeleitet». Bitte Referenz / Link zur Webseite hinzufügen.	PH: Hierzu gibt es keine Studie oder Bericht. Es handelt sich um eine Herleitung des UGZ eigens für die vorliegende Studie. Die Berechnungen sind in einer Exceltabelle dokumentiert.
AD		2.3		<i>ed</i>	Bitte eine kurze Erklärung/ Andeutung zu sonROAD18 und eine Referenz einfügen.	HA: SonRoad 18 ist noch nicht publiziert... von Auftraggebern zu liefern (CB: Fussnote eingefügt)
AD		2.3		<i>ed</i>	Die Autoren erwähnen die «Swiss10-Kategorien». Bitte kurz erläutern, was damit gemeint ist.	Auftraggeber (CB: Fussnote hinzugefügt)
AD		2.3		<i>ed</i>	Die Autoren schreiben «Bei ÖV-Bussen wurden Angaben der VBZ verwendet». Referenz / Quelle?	AD: Quelle hinzugefügt.
AD		2.3		<i>ge</i>	Was heisst hier «nicht unbedingt»? Gibt es trotzdem Situationen, in dem ein falsches Bild entsteht?	AD: Satz gelöscht.
AD		2.3		<i>ed</i>	Die Autoren schreiben «Mittels einer von der WHO vorgegebenen Exposure-Response-Funktion, in welche die Anzahl der in den Nachtstunden über einem Leq	PH: Quelle zu «Exposure-Response-Funktion»: M. Basner, S. McGuire, «WHO Environmental Noise Guidelines

⁶ PH: Peter Hofmann

					von 40 dB(A) belasteten Personen einfließt, sowie einem mittleren Disability-Weight (Faktor zur Gewichtung der Schwere der Krankheit/Behinderung) von 0.07 wurden die DALY ermittelt.». Referenz zur Exposure-Response-Funktion?	for the European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Effects on Sleep», 2018, S. 22 Quelle zu «Disability Weight»: WHO, «Burden of disease from environmental noise», 2011, S. 60-61
AD		2.3			Die Autoren schreiben «Das Resultat der Untersuchung des UGZ zeigt: im Jahr 2017 waren infolge durch Strassenverkehrslärm verursachter Schlafstörungen in der Stadt Zürich insgesamt 1133 DALY zu verzeichnen.». Referenz zur Studie?	PH: Hierzu gibt es keine Studie oder Bericht. Es handelt sich um eine Untersuchung des UGZ. Das Resultat der Untersuchung sind einzelne Exceltabellen.
CB		2.3	Kosten	te	Die Autoren schreiben «Am Lebensende wird das Fahrzeug verschrottet und es wird angenommen, dass die Verschrottungskosten gleich hoch sind wie der Restwert der Materialien. Das heisst, es entstehen am Lebensende keine Kosten, aber auch kein Profit.». Diese Annahme ist sehr vereinfacht. Worauf basiert diese Annahme? Auch können zukünftige Preise für zurückgewonnene Materialien stark variieren, je nach Angebot/Nachfrage und Vorkommen. Die Systemgrenze ist damit auch eine andere wie für die LCA, da bei cut-off die Einnahme resp. Gutschriften nicht einberechnet werden. Es ist empfehlenswert für LCA und LCC die gleichen Systemgrenzen zu setzen.	HA: Diese Annahme reflektiert den Cut-off, in dem gesagt wird, dass ein Fahrzeug, das ins Recycling geht, keine Benefits aus den Materialien kriegt, die im Recycling wiedergewonnen werden. Vielleicht müsste man statt «Verschrottung» Recyclingkosten sagen, da diese mehr beinhalten als die Verschrottung. BC: Text angepasst. PH: Einnahmen bei öffentlichen Verkehrsmitteln sind nicht berücksichtigt.

					Sind bei öffentlichen Verkehrsmitteln Einnahmen mitkalkuliert?	
AD		3.1.		ed	Sind Daten zu den Gewichten und Materialisierung zumindest im Tool ersichtlich? Wenn ja, sollte hier erwähnt werden, wo diese im Tool gefunden werden können.	BC: Siehe Kap. 3.1.1
AD		3.1.		ed	Sind Daten zu Energieverbräuche, Lebenserwartung, Fahrzeugkosten, usw. zumindest im Tool ersichtlich? Wenn ja, sollte das hier erwähnt werden.	BC: Siehe Kap. 3.1.1
CB		3.1.		ed	Referenz zu HBEFA 4.1 einfügen.	AD: Referenz hinzugefügt.
AD		3.1.		ge	Was in diesem Abschnitt oder in 3.2 noch fehlt ist für die mittleren Personenwagen, eine Zusammenstellung (am liebsten in der Form einer Tabelle) der wichtigsten Eckdaten zu den Fahrzeugen: -Gewicht Karosserie -Gewicht Antriebsstrang -Gewicht Batterie -Gewicht Power electronics -Gewicht Brennstoffzelle und Zugehörige -...	BC: Siehe Anhang 1-3
AD		3.1.3.		ed	Bitte exemplarisch für die mittleren Personenwagen eine Tabelle einfügen, in der für die oben erwähnten Unsicherheiten spezifisch angegeben werden und die Begründung dafür.	BC: Siehe Anhang 4.
AD		3.2.1.		te	Die Autoren schreiben «Die Unterschiede zwischen Fahrzeugtypen und zukünftiger Technologienentwicklung werden berücksichtigt, indem die Inventardaten pro Kilogramm bzw. pro Fläche konstant gehalten und entsprechend der angenommenen Leistungsdichte skaliert werden (Cox 2019)». Unklar: Bitte den Zusammenhang	BC: Text angepasst. Für weitere Infos sie Cox (2018) oder Cox et al (2020).

					zwischen Leistungsdichte und Gewicht erläutern.	
AD		3.2.1.		te	Auf was basieren die Annahmen zum Brennstoffzellenersatz Annahmen, auch auf Cox und Bauer 2019?	PH: Gemäss Fahrzeugdefinition.xlsx, Blatt «Annahmen» gibt es verschiedene Quellen. Letztendlich stammen aber alle Angaben von Cox und Bauer. Entweder aus bestehenden Studien 2018 und 2019 oder es sind Annahmen, die Cox und Bauer für die vorliegende Studie getroffen haben.
		3.2.2.	Tab. 8	ge	Annahmen bzw. Adaptionen für die Zukunft basieren worauf?	HA: Cox et al (2020)
AD		3.2.3.		ed	Die Autoren schreiben «Als Beispiel dafür, wie diese im Excel-Tool abzubilden sind, haben wir einen elektrischen Depotlader-Bus mit LFP Batterien für 2020 abgebildet als Defaultfahrzeug». Unklar, was hier als Beispiel gemeint ist.	BC: Text angepasst.
CB		3.2.3.		ed	Die Autoren schreiben «Diese Kosten gelten für die ganze Batterie und repräsentieren die Kosten, die Fahrzeugbesitzer bezahlen.» Welche zusätzlichen Kosten beinhaltet dies? Eine kurze Erwähnung wäre hilfreich für das Verständnis.	HA: Der Unterschied zwischen Produktionskosten und Konsumentenpreisen kommt von: Marge Produzent Distributionskosten Zölle / Steuern Marge Händler BC: Text angepasst.
AD		3.2.3.		te/ed	Die Autoren schreiben «Wir nehmen an, dass Batterien in Personenwagen, Lieferwagen und Motorrädern im Normalfall während der Lebensdauer nicht ersetzt werden.». Gibt es eine Begründung und Referenz zur Unterstützung dieser Annahmen?	HA: Die Lebensdauern von Batterien sind bez. Zyklen völlig unproblematisch für praktisch jede Anwendung eines Passagierfahrzeug-

						<p>ges. Und die Kalendarische Lebensdauer ist mindestens 10 Jahre (Erfahrungen von TESLA). In einigen modernen BEV sind die Batterien zudem Teil der Struktur. Das macht ein Ersetzen unwahrscheinlich. Reparieren hingegen ist möglich (einzelne Zellen ersetzen).</p> <p>BC: Die Werte sind Experteneinschätzungen, da noch keine ausreichenden Quellen vorhanden sind.</p>
CB		3.2.3.		te	<p>Die Autoren schreiben «Die Materialzusammensetzung der Batterien und ihrer Zellen wird für 2030/40/50 nicht verändert; dank steigender Energiedichte wird allerdings pro kg Batterie(zelle) mehr Strom gespeichert.». Wird steigende Effizienz (z.B. effizientere Motoren) anderer Antriebsarten auch berücksichtigt?</p>	HA: ja
AD		3.2.4.		ed	<p>Bitte noch exemplarisch für die mittleren Personenwagen eine Tabelle mit den Verbräuchen für die unterschiedlichen Technologien hinzufügen (z.B. kWh/km für BEVs, usw.).</p>	BC: Anhang 1.
AD		4.1.2.		ge	<p>Hier werden unterschiedliche Stromszenarien erwähnt. Es unklar, ob in den Defaultergebnissen (z.B. 5.1.8) das ins Bild kommt oder nur in den Sensitivitäten?</p>	BC: Anfangs kap. 5.

AD		4.1.5.		te	Die Autoren schreiben «Diese werden als Reststoffe betrachtet, der Vergärungsprozess demgemäss als Abfallentsorgungsprozess und das Biogas vor der Aufbereitung als «Nebenprodukt», dem keine Umweltbelastungen angerechnet werden». Ist in der Zwischenzeit die Produktion von Biogas nicht das Hauptprodukt geworden und wird es zukünftig nicht noch stärker so sein?	CHB ⁷ : Ist genauso wie beschrieben – gerechnet mit ecoinvent v3.6; Biogas in ecoinvent ist tatsächlich speziell, vor allem, da je nach Version hin- und hergewechselt wird zwischen Abfallentsorgung und Biogas als Referenzprodukt.
AD		4.2.		ed	Zum Thema Kosten werden nur die Energiekosten hier zusammengefasst. Bitte auch alle anderen betrachteten Aspekte (Infrastruktur, Wartung, usw.) zumindest für den mittleren Personenwagen, tabellarisch zusammenfassen.	BC: Siehe Anhang 3.
AD		4.2.	Tab. 14	te	Es werden unterschiedliche Preise für den gleichen Energievektor (z.B. Strom) bei verschiedenen Fahrzeugen benutzt (z.B. Velo vs Personenwagen). Es sollte erwähnt werden, wie diese Unterschiede entstehen. Für alle Energievektoren.	HA: Kosten beinhalten die Kosten für die Ladeinfrastruktur. Bei Fahrrad ist das null (Haushaltsteckdose). Bei e-PW ist es relevant, wenn man pro 1-2 BEV eine 11 oder 22 kW Ladestation in der Garage montiert.
AD		5.1.2.		ed	Hier wie auch beim Primärenergieverbrauch wären Angaben zu den Effizienzen z.B. der Brennstoffzellen wichtig. Diese Daten könnten in tabellarischer Form im Kapitel Fahrzeugmodellierung zusammengefasst werden.	BC: Energieverbrauch von Fahrzeugen ist von HBEFA 4.1. Annahmen zu Brennstoffzelleneffizienz kann nicht ausgegeben werden, da sie nicht direkt gemessen wird. HBEFA basiert auf Messungen von Energieverbrauch pro Kilometer – die im Excel und Bericht sichtbar gemacht haben.

⁷ CHB: Christian Bauer

AD		5.1.2.		te	Die Autoren schreiben «Darüber hinaus werden Autos mit Verbrennungsmotoren in den nächsten Jahrzehnten noch viel effizienter, da sie alle hybridisiert werden können.». Kann noch eine Angabe zum Effizienzgewinn gemacht werden?	BC: Umstieg auf Hybrid bringt etwa 20% Effizienzgewinn
AD		5.1.3.	Abb. 6	te	Die Preise für konventionelle Technologien bleiben konstant. Kann man das auch in der vergangenen Entwicklung so beobachten? Es sieht so aus, als grundsätzlich der etablierte Teil der Technologien (z.B. auch die Karosserie) keine Preisänderung zeigen wird. Oder ist eher der Punkt, dass diese Änderungen bei allen Antriebssträngen gleich sein werden und entsprechend nicht relevant sind?	HA: beides
AD		5.1.4.		ed	Im Methodik-Teil zu den Kosten werden nur die Energiekosten beschrieben. Die anderen Aspekte nachzuvollziehen ist schwierig. Bitte auch die anderen Aspekte dokumentieren.	BC: siehe Anhang 3.
AD		5.1.8.		ed	Die Autoren schreiben «Das heisst: je mehr mit einem Elektroauto gefahren wird, desto besser scheidet es vergleichsweise ab.». Schwieriges Wording: so formuliert erhält man den Eindruck, dass man allgemein mit eAutos mehr fahren sollte. Ich vermute, dass eher gemeint ist, dass diese Fahrzeuge eine höhere Lebensdauerdistanz haben sollten (wie im Fazit auf Seite 64 beschrieben), damit insgesamt die Lebenszyklusemissionen aus der Produktion stärker amortisiert werden.	HA: wenn man es auf ein einzelnes Fahrzeug bezieht, wird es klar.

Folgende Kommentare zu Kapitel 6 etc. zum Zürich Mobilitäts-Umweltindex (ZMU): Auflistung rein informativ, nicht relevant für kritisches Review.						
AD		6.2.1.			Der Teil zur Erklärung der Wirkungsmethode ist auch wichtig, damit Leser die Kommentare zu den Unsicherheiten bei Moek und Recipe besser nachvollziehen können. Ich sehe ein, dass es für die Struktur des Berichtes nicht optimal sein könnte, man könnte sich fragen, ob dieser Teil nicht schon in 2.3 erwähnt werden sollte.	BC: ZMU soll im eigenen Kapitel bleiben, da er nicht ISO-kompatibel ist.
AD		6.3.	Tab. 16	ed	Es wäre hilfreich, wenn diese Informationen in der Form einer weiteren Säule (z.B. «Normalisierungsart» oder ähnliches) für jeden Indikator ergänzt wird. Z.B. Bei Treibhausgasemissionen «Globale CO2 Emissionen im Jahr 2008».	MF ⁸ : Tabelle wurde angepasst.
Kommentare zu Kapitel 7.						
AD		7.		ge/te	Ein guter Teil des Fazits sind eigentlich Ergebnisse, die soweit nicht besprochen wurden und zu Fahrzeugen, zu denen der Leser die Annahmen nicht kennt und sich nicht wirklich kritisch äussern kann. Ich würde empfehlen, noch ein Kapitel mit ausgewählten Ergebnissen zu diesen Aussagen einzuführen. Eine Diskussion zum Einfluss der Grösse der Personenwagen wäre noch spannend und wichtig gewesen.	HA: Am Anfang des Fazits nochmal hingewiesen, dass Daten und Resultate z.T. nur im Excel sind.
AD		7.		ge/te	Im Fazit erwähnen die Autoren gewisse Schlussfolgerungen zu Fahrzeugen wie E-Trottinettes, E-Velos oder Traktoren, ohne	HA: (Gem. Goal & Scope, mit Auftraggeber abgestimmt).

⁸ MF: Mireille Faist

					<p>die Annahmen und Zahlen dazu vorgestellt zu haben. Es entsteht die Herausforderung, dass laut Auftrag die Zielgruppe der Studie die EntscheidungsträgerInnen der Stadt und des Kantons Zürich sind (welche auch Zugriff auf das Excel-Tool haben und somit Zugriff auf weitere Daten und Ergebnisse haben werden), der Bericht jedoch (ohne Excel-Tool) öffentlich verfügbar sein wird. Ein Teil der Leser wird entsprechend nur Zugriff auf den Bericht haben. Diese können gewisse Aussagen nicht kritisch hinterfragen.</p>	<p>Das Review kann / darf darum nicht davon ausgehen, dass der Bericht veröffentlicht werden soll, da dies gem. Goal & Scope nicht vorgesehen ist.</p>
--	--	--	--	--	---	--

Eigenständigkeitserklärung

Wir, die Unterzeichnenden, erklären hiermit, dass:

- wir keine Voll- oder Teilzeitmitarbeiter des Auftraggebers oder der Durchführenden der Ökobilanzstudie sind,
- wir nicht involviert waren in der Definition der Systemgrenzen oder sonstigen Arbeiten während der Durchführung der Ökobilanz, d.h. wir waren keine Mitglieder der Projektteams des Auftraggebers oder der Durchführenden,
- wir kein finanzielles, politisches oder weiteres Interesse an den Resultaten der Studie hatten.

Wir bestätigen, dass obengenannte Aussagen wahr und vollständig sind.

Datum: 29.06.2020

Name: Andrea Del Duce

Unterschrift:



Name: Corinna Baumgartner

Unterschrift:

