



27. April 2023

---

# **Umweltauswirkungen von Personenwagen mit verschiedenen Antriebssystemen**

Gegenwart (2021) und Zukunftsszenarien (bis 2050).

Fachbericht des Bundesamtes für Umwelt BAFU.

---



## **Herausgeber**

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

## **Autorinnen und Autoren**

Philipp Hallauer, Doris Ochsner Tanner (BAFU, Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien)

Frank Hayer (BAFU, Abteilung Ökonomie und Innovation)

## **Zitierung**

BAFU 2023: Umweltauswirkungen von Personenwagen mit verschiedenen Antriebssystemen. Gegenwart (2021) und Zukunftsszenarien (bis 2050). Fachbericht des Bundesamtes für Umwelt BAFU. Bundesamt für Umwelt, Bern.

Diese Publikation ist auch in französischer Sprache (ganzer Bericht) sowie in Italienisch und Englisch (Zusammenfassung) verfügbar.

Die Originalversion ist Deutsch.

© BAFU 2023

## Zusammenfassung

Das Wichtigste in Kürze:

Der Bericht vergleicht die Umweltauswirkungen von unterschiedlich angetriebenen Personenwagen über deren ganzen Lebenszyklus. Die Berechnungen basieren auf Ökobilanz-Inventardaten, die vom Paul Scherrer Institut 2022 aktualisiert worden sind.

Personenwagen mit batterieelektrischem Antrieb verursachen weniger Treibhausgasemissionen, eine tiefere gesamte Umweltbelastung und einen geringeren kumulierten Energieverbrauch als vergleichbare Personenwagen, die mit Benzin, Diesel, Erdgas oder Wasserstoff aus nicht erneuerbarer Energie angetrieben werden. Nur Brennstoffzellenfahrzeuge, die mit Wasserstoff aus erneuerbarer Energie betrieben werden, weisen eine ähnlich gute Umweltbilanz auf wie batterieelektrische Fahrzeuge.

Unabhängig vom Antriebssystem belasten kleine und leichte Personenwagen die Umwelt weniger als grosse und schwere Personenwagen.

Die Zukunftsszenarien basierend auf den Energieperspektiven 2050+ des Bundes zeigen, dass batterieelektrische Fahrzeuge im Vergleich zu anderen Antriebsarten zwischen 2030 und 2050 das grösste Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und der gesamten Umweltbelastung bieten.

Der vorliegende Fachbericht vergleicht die Umweltauswirkungen der Nutzung von Personenwagen mit verschiedenen Antriebssystemen über ihren gesamten Lebenszyklus. Die Analyse basiert auf Ökoinventaren, die in den Jahren 2021 - 2022 aktualisiert und zum Teil neu erstellt worden sind.

Der Bericht beschreibt die methodischen Grundlagen der Ökobilanzierung, die verwendeten Datengrundlagen, das Vorgehen sowie die getroffenen Annahmen bei der Erstellung der Inventare. Im Hauptteil werden die Resultate für die erstellten Inventare präsentiert, eingeordnet und mit Sensitivitätsanalysen ergänzt. Schliesslich beschreibt der Bericht Entwicklungspotenziale für zwei Zukunftsszenarien und Schlussfolgerungen zur Reduktion der Umweltauswirkung von Personenwagen.

Die **Resultate in Abbildung A1** zeigen einen Vergleich der Umweltwirkung von Mittelklassefahrzeugen mit verschiedenen Antriebssystemen, bilanziert über Fahrzeugherstellung, -betrieb, -unterhalt und -entsorgung, sowie über die Bereitstellung der Energieträger und die Infrastruktur. Die tiefsten Umweltauswirkungen zeigt das mit erneuerbarem Strom betriebene batterieelektrische Fahrzeug (BEV). Im Vergleich zum Benzinfahrzeug stösst es 65 % weniger Treibhausgase (THG) aus. Es belastet die Umwelt insgesamt um 44 % weniger und hat einen um 32 % geringeren kumulierten Energieaufwand.

Wird ein BEV mit dem Verbraucher-Strommix betrieben, so hat es ebenfalls tiefere Umweltauswirkungen als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren, aber etwas weniger deutlich. Es verursacht 55 % weniger Treibhausgasemissionen, weist eine um 23 % geringere gesamte Umweltbelastung und einen um 5 % geringeren kumulierten Energieaufwand als das Benzinfahrzeug auf.

Ein Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV), das mit Wasserstoff aus erneuerbaren Quellen betrieben wird, zeigt vergleichbare Umweltwirkungen wie das mit erneuerbarem Strom betriebene BEV. Hingegen verursacht ein FCEV mit Wasserstoff, der mit dem Verbraucher-Strommix hergestellt wurde deutlich mehr Treibhausgasemissionen als die BEV.

Die höchsten Treibhausgasemissionen weist das Benzinfahrzeug auf. Die höchste gesamte Umweltbelastung sowie der grösste kumulierte Energieaufwand wird vom Brennstoffzellenfahrzeug verursacht, das mit Wasserstoff betrieben wird, welcher mit dem Verbraucher-Strommix hergestellt wurde. Die gesamte Umweltbelastung dieses Fahrzeugs ist um 17 % höher als diejenige des Benzinfahrzeugs und der kumulierte Energieaufwand liegt um 77 % höher als derjenige des Benzinfahrzeugs. Diesel- und Gasfahrzeuge liegen bei allen Indikatoren leicht unter dem Benzinfahrzeug.

Die Hybridisierung bringt beim Benzinfahrzeug Einsparungen der Treibhausgasemissionen von 7 % (Hybrid) bis 16 % (Plug-In-Hybrid, PHEV), allerdings ist die Einsparung beim PHEV stark vom Ladeverhalten abhängig. Wird die gesamte Umweltbelastung von Hybridfahrzeugen betrachtet, fällt die Reduktion geringer aus als bei den Treibhausgasen. Der kumulierte Energieaufwand sinkt durch die Hybridisierung um 6 %, beim PHEV steigt der kumulierte Energieaufwand im Vergleich zum Benzinfahrzeug minimal an.



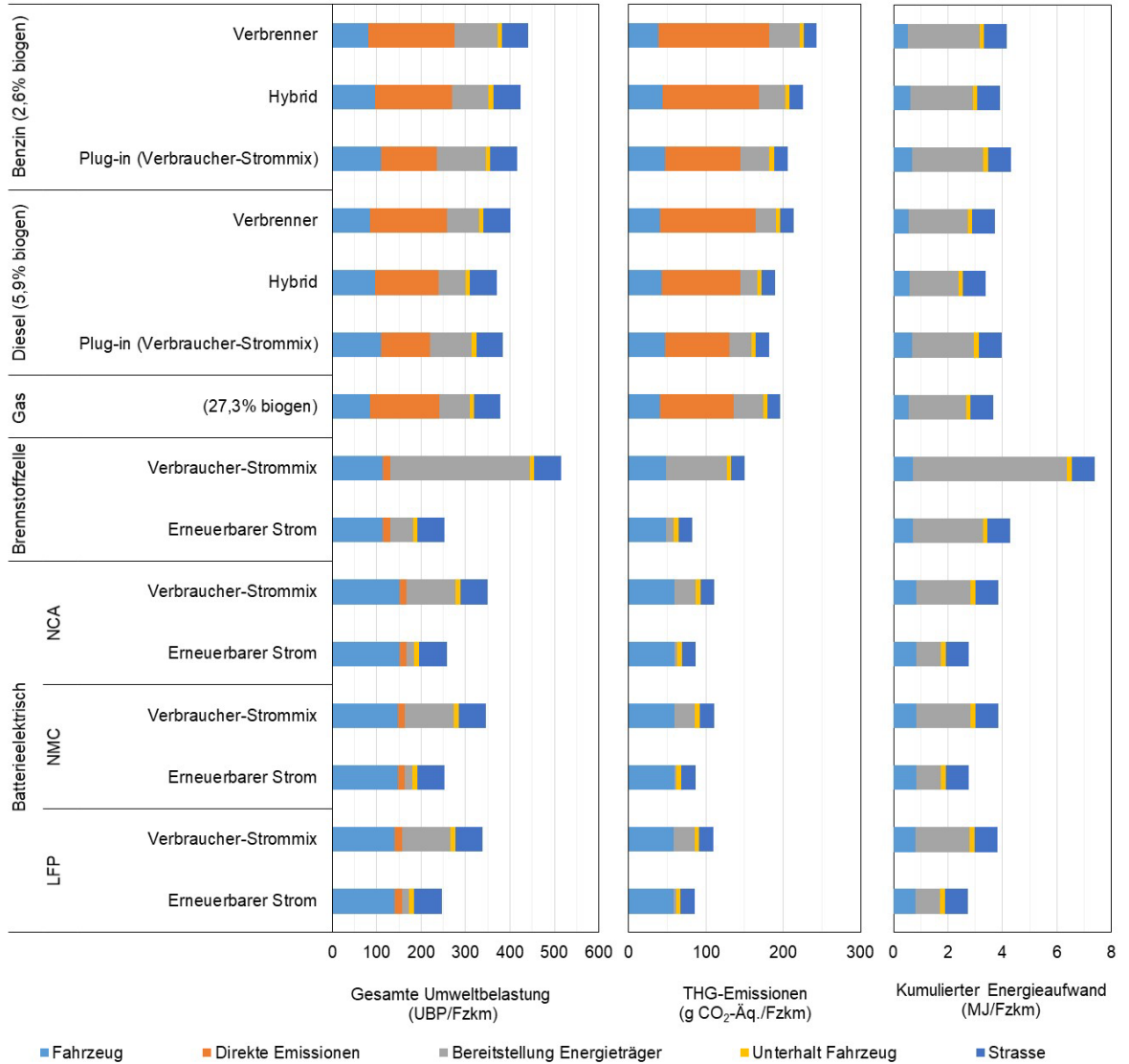


Abbildung A1: Einfluss der verschiedenen Antriebssysteme auf die gesamte Umweltbelastung (UBP), die Emission von Treibhausgasen (g CO<sub>2</sub>-Äq.) und den kumulierten Energieaufwand (MJ) pro gefahrener km (Fzkm) eines Mittelklasse Personenwagens (1250-1750 kg, Beispielfahrzeuge siehe Tabelle 2, Zahlenwerte siehe Tabelle 12).

Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare, 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %).

Erneuerbarer Strom (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare).

Hinweis: Die Umweltbelastung bestimmter Fahrzeuge sowie ein individueller Strommix kann durch Eingabe der wichtigsten Parameter in der Excel-Tabelle unter [www.mobitool.ch](http://www.mobitool.ch) abgeschätzt werden.

NCA: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid

NMC: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid

LFP: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Eisenphosphat (LiFePO<sub>4</sub>)

Vergleicht man die **verschiedenen Grössenklassen von Personenwagen** untereinander, so zeigt sich, dass kleinere und leichtere Fahrzeuge bei allen Antriebsarten weniger umweltbelastend sind als grössere und schwerere. Die Spannweite der betrachteten Fahrzeuge zeigt ein Reduktionspotenzial von 75 % Treibhausgasemissionen zwischen dem grössten Benzinfahrzeug (Oberklasse SUV) und dem BEV-Kompaktfahrzeug mit Verbraucher-Strommix.

Im **Vergleich zum öffentlichen Verkehr (ÖV) und den mit dem Fahrrad zurückgelegten Wegen** verursachen Personenwagen mit Abstand die höchsten Treibhausgasemissionen und die grösste gesamte Umweltbelastung. Über 5 km verursacht ein Benzinfahrzeug der Mittelklasse etwa 12-mal mehr, ein batterieelektrisches Fahrzeug etwa 6-mal mehr Treibhausgasemissionen als der durchschnittliche ÖV<sup>1</sup>. Im Vergleich zum Fahrrad stösst ein Benzinfahrzeug etwa 26-mal mehr Treibhausgasemissionen aus, ein batterieelektrisches Fahrzeug etwa 12-mal mehr.

Die beiden betrachteten **Zukunftsszenarien** «Weiter Wie Bisher» (WWB) und «Netto-Null» in der Basisvariante (ZERO-Basis) sind angelehnt an die Energieperspektiven 2050+ des Bundes und wurden mit Annahmen zur technologischen Entwicklung der Fahrzeuge ergänzt. Die Auswertung dieser Szenarien zeigt, dass batterieelektrische Fahrzeuge zwischen 2030 und 2050 das grösste Potenzial zur Reduktion von Treibhausgasemissionen bieten. Der Einsatz von Wasserstoff bzw. auf Strom basierenden synthetischen Treibstoffen, die zwischen 2030 und 2050 mit dem für diese Periode vorausgesagten Strommix hergestellt werden, führt zu keiner weiteren Reduktion von Treibhausgasemissionen und der gesamten Umweltbelastung im Vergleich zu den jeweiligen BEV. In den betrachteten Szenarien führt ihr Einsatz auch im Vergleich zum heutigen BEV nicht zu einer Reduktion von Treibhausgasen. Wenn ausschliesslich erneuerbare Antriebsenergie eingesetzt wird, verursachen BEV die niedrigsten Treibhausgasemissionen und die tiefste gesamte Umweltbelastung von allen untersuchten Antriebssystemen.

Das zusätzliche Reduktionspotenzial der batterieelektrischen Fahrzeuge wird hauptsächlich bestimmt durch eine höhere **Lebensfahrleistung** des Fahrzeugs und **leichtere Batterien**. Eine Weiterverwendung der Batterie (**Second-Life**) und vermehrtes **Recycling** der Batterie bieten im Vergleich dazu aus Treibhausgas- und Umweltperspektive ein geringeres Reduktionspotenzial, allerdings spielt neben der Umweltwirkung bei der Rohstoffbereitstellung auch die Verfügbarkeit der Rohstoffe eine Rolle. Der Aspekt der Rohstoffverfügbarkeit kann im vorliegenden Bericht nicht vertieft betrachtet werden, berücksichtigt wurden jedoch bereits bestehende Recyclingprozesse.

Die **Möglichkeiten, die Auswirkungen auf die Umwelt zu senken**, präsentieren sich aufgrund der Resultate wie folgt:

Das grösste Potenzial liegt in der Wahl der Verkehrsmittel, da der öffentliche und der Veloverkehr um ein Vielfaches geringere Umweltwirkung verursachen, wie der Verkehrsmittelvergleich zeigt. Im Weiteren kann mit der Wahl eines batterieelektrischen Antriebssystems die Umweltbelastung pro Kilometer deutlich geringer gehalten werden als mit anderen Antriebssystemen. Erneuerbarer Strom und ein niedriges Fahrzeuggewicht spielen dabei eine wesentliche Rolle. Eine weitere Reduktion der Umweltwirkung kann mit einer langen Lebensfahrleistung von batterieelektrischen Fahrzeugen, durch häufiges Laden von vorhandenen Plug-In-Hybriden und durch den Einsatz von rezyklierten Stoffen in der Batterie realisiert werden.

Die **aktualisierten Ökoinventare** von Personenwagen, welche in diesem Bericht präsentiert werden, sind dokumentiert und stehen für weitere Arbeiten im Bereich Lebenszyklusanalysen als Grundlage zur Verfügung.

---

<sup>1</sup> Siehe Excel-Tabelle unter [www.mobitool.ch](http://www.mobitool.ch)

## Inhalt

	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Einführung und Ausgangslage.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>12</b>
2.1	Ökobilanzierung als Methode zur Analyse der Belastung der Umwelt .....	12
2.2	Wirkungsabschätzung im Rahmen der Ökobilanzierung mit der Methode der ökologischen Knappheit .....	13
2.3	Grundlagen für die Bilanzierung der Umweltauswirkungen von Personenwagen mit verschiedenen Antriebssystemen .....	14
2.3.1	Hintergrunddatenbestand für die Ökobilanzierung .....	14
2.3.2	Ziel und Untersuchungsrahmen .....	15
2.3.3	Wirkungsabschätzung .....	16
2.3.4	Datenquellen für die Modellierung der aktuellen Fahrzeuge .....	16
2.3.5	Modellierte Fahrzeugkategorien und Fahrzeuge .....	17
	Kategorisierung der Fahrzeuge.....	17
	Berücksichtigte Antriebe .....	18
	Modellierte Fahrzeuge.....	18
	Antriebsenergie .....	19
	Besonderheit Plug-In-Hybride .....	20
2.4	Grundlagen für die potenziellen technischen Entwicklungen bei Personenwagen .....	21
	Datenquellen für die Modellierung der zukünftigen Fahrzeuge .....	21
	Grenzen der Modellierung und Unsicherheiten .....	23
<b>3</b>	<b>Resultate .....</b>	<b>24</b>
3.1	Vergleich verschiedener Antriebstechnologien .....	24
3.2	Nach wie vielen Fahrzeugkilometern ist ein alternativer Antrieb umweltfreundlicher als ein Benzinfahrzeug? .....	28
3.3	Einfluss der Fahrzeuggrösse .....	30
3.4	Vergleich mit anderen Verkehrsmitteln .....	32
3.5	Entwicklungspotenziale .....	35
	Einfluss des für die Bereitstellung der Antriebsenergie verwendeten Stromes .....	37
<b>4</b>	<b>Einordnung der Resultate und zusätzliche Sensitivitätsanalysen .....</b>	<b>39</b>
4.1	Vergleich mit anderen Ökobilanzen von Personenwagen .....	39
4.2	Betrachtung spezifischer Aspekte bei aktuellen Fahrzeugen .....	41
4.2.1	Einfluss der Produktionstechnologie des verwendeten Stromes für die Bereitstellung der Antriebsenergie .....	42
4.2.2	Einfluss des elektrischer Fahranteils bei PHEV .....	43
4.3	Einfluss der Bewertungsmethode .....	44
4.4	Zukünftige Fahrzeuge: Betrachtung spezifischer Aspekte .....	45
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>Verzeichnisse .....</b>	<b>51</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>51</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>52</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>54</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>56</b>

<b>7</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>57</b>
7.1	Annahmen zu den Fahrzeugkategorien .....	57
7.2	Datentabellen zu den Abbildungen .....	58
7.3	Zukünftige Strommixe .....	72
7.4	Allokation der Umweltbelastung bei der Herstellung von synthetischen Treibstoffen ....	74

## 1 Einführung und Ausgangslage

Welche Umweltauswirkungen haben die verschiedenen Antriebsarten von Personenwagen? In welchem Umfang können alternative Antriebe die Treibhausgasemissionen des Personenverkehrs senken? Schneiden Elektroautos heute bei der gesamten Umweltwirkung, d.h. unter Berücksichtigung von Luftschadstoffen, Lärm und weiteren Belastungen, über den ganzen Lebenszyklus besser ab als vergleichbare Autos mit Verbrennungsmotoren? Wie hoch ist die Umweltbelastung aus dem Fahrbetrieb, wie hoch aus der Fahrzeugherstellung, und welche Auswirkung hat die Energiebereitstellung?

Die Beantwortung dieser Fragen steht im vorliegenden Fachbericht im Zentrum. Der Bericht zeigt die Ergebnisse der aktualisierten Inventare von Personenwagen mit unterschiedlichen Antriebssystemen. Er trägt damit auch dem Anliegen aus dem Postulat 19.3374 «Zeitgemässe und zukunftsgerichtete Erhebung der Umweltwirkungen von Personenwagen» von Nationalrat Jürg Grossen Rechnung.

Der Sektor Verkehr (ohne den internationalen Flugverkehr) verursachte 2020 32% aller Treibhausgasemissionen der Schweiz. (BAFU, 2022) Innerhalb des Sektors Verkehr ist der Personenverkehr auf der Strasse (Personenwagen, Motorräder, Reisebusse) mit etwa 70 % die grösste Verursachergruppe. Die Treibhausgasemissionen des Personenverkehrs betragen 2019 7 % mehr als im Jahr 1990 mit dem Referenzwert von 10.51 Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Im Jahr 2020 sanken sie auf ein Niveau von etwa 92 % des Ausgangswertes von 1990, dies aufgrund der Massnahmen zur Eindämmung der Coronavirus-Pandemie. Die jährliche Fahrleistung hat von 1990 bis 2019 hingegen um 38.5 % zugenommen. Dies zeigt, dass eine beträchtliche Reduktion der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilometer erreicht wurde (Abbildung 1). Innerhalb des Personenverkehrs verursachen die Personenwagen die weitaus meisten Treibhausgasemissionen.

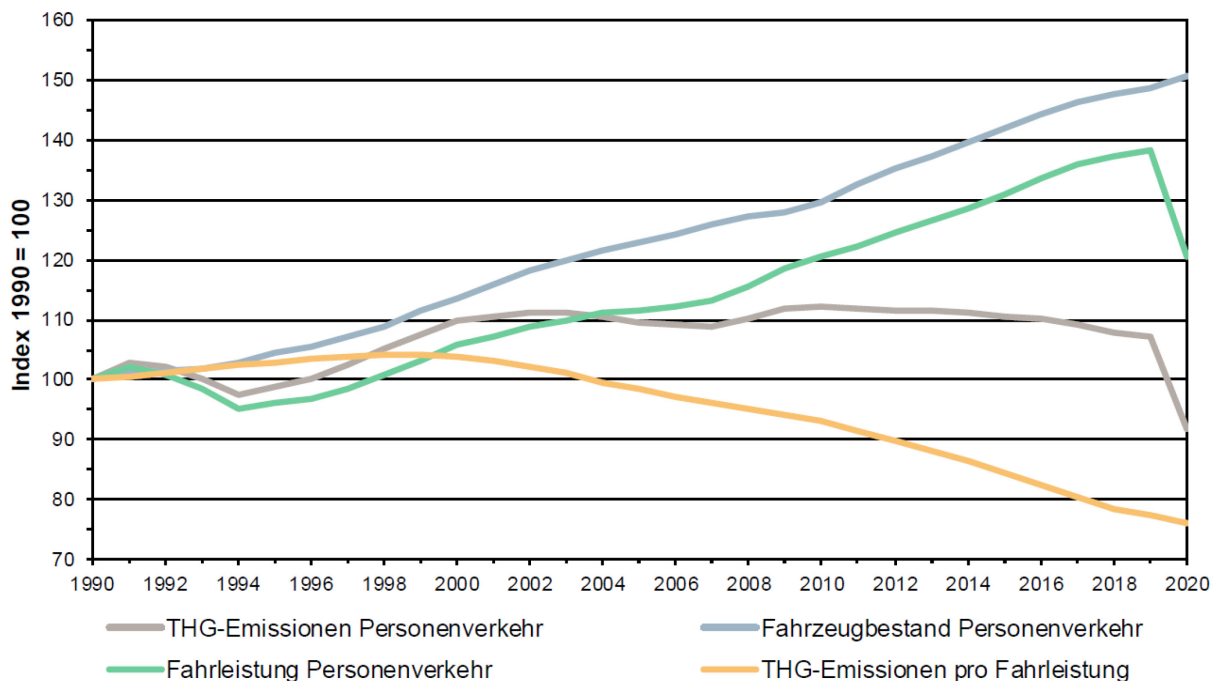


Abbildung 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Personenverkehrs (Personenwagen, Motorräder, Reisebusse) seit 1990, zusammen mit den relevanten Kenngrössen Fahrzeugbestand des Personenverkehrs und Fahrleistung (km) des Personenverkehrs. Auch gezeigt sind die Treibhausgasemissionen pro Fahrleistung des Personenverkehrs (BAFU, 2022).

Die Luftschadstoff-Emissionen Stickoxide (NOx) und Feinpartikel (PM) sind in den letzten Jahren dank strengerer Abgasgesetzgebung und technischer Fortschritte bei der Abgasnachbehandlung gesunken. Dennoch stammten 2020 etwa 60 % der NOx-Emissionen der Schweiz aus dem Verkehr, davon wiederum knapp 60 % von den Personenwagen (EMIS, 2022).

Der Strassenverkehr zählt in der Schweiz deutlich vor der Eisenbahn und dem Flugverkehr zu den wichtigsten Lärmquellen. Während bei modernen Personenwagen das Antriebsgeräusch leiser wurde, erhöhte sich hingegen das Abrollgeräusch aufgrund schwererer Autos und breiterer Reifen.

2020 gab es in der Schweiz 4.7 Mio. Personenwagen, damit wurden 49 Mrd. Fahrzeugkilometer bzw. rund 80 Mrd. Personenkilometer<sup>2</sup> zurückgelegt (BFS, 2022A). 98.5 % der Fahrzeuge waren 2021 mit einem Verbrennungsmotor ausgerüstet (BFS, 2022B). Allerdings hat sich in den letzten Jahren das Angebot und der Marktanteil von batterieelektrischen Personenwagen (Battery Electric Vehicles BEV) laufend vergrössert, 2022 liegt der Anteil an BEV bei den Neuzulassungen von Personenwagen bei knapp 18 % (siehe Abbildung 2). Die Anteile der unterschiedlichen Antriebstechnologien bei den 2022 neu zum Verkehr zugelassenen Personenwagen sind in Abbildung 2 dargestellt.

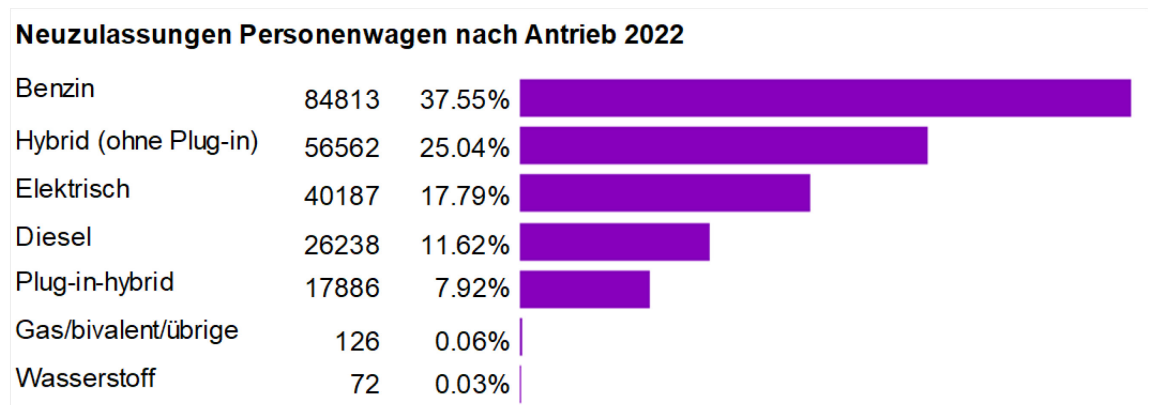


Abbildung 2: Neuzulassungen Personenwagen nach Antrieb 2022 (ASTRA, 2022).

Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (Internal Combustion Engine ICE) stellen die Emissionen von Luftschadstoffen und Treibhausgasen im Abgas einen grossen Teil ihrer Umweltbelastung dar. Bei Personenwagen mit elektrischem Antrieb sind hingegen die Emissionen aus der Herstellung dominant, welche zum Zeitpunkt der Fahrt bereits stattgefunden haben und grösstenteils im Ausland angefallen sind.

Ökobilanzen können genutzt werden, um die Umweltauswirkungen von Personenwagen über deren gesamte Lebensfahrleistung und ortsunabhängig zu erfassen. Die Bilanzierung erlaubt es, ein breites Spektrum an Umweltauswirkungen zu berücksichtigen. Für deren Bewertung und Vergleichbarkeit erfolgt eine Wirkungsabschätzung mit der Methode der ökologischen Knappheit (UBP-Methode). Der Bewertungsmassstab dieser Methode orientiert sich an den Schutzziele der Umweltgesetzgebung der Schweiz. Neben der gesamthaft betrachteten Umweltbelastung mit der UBP-Methode stehen die Treibhausgasemissionen sowie Energiebedarfsbilanzen im Fokus. Diese und weitere Grundlagen werden im nächsten Kapitel detaillierter ausgeführt.

Die technologische Entwicklung, insbesondere bei den BEV, schreitet rasch voran. Deshalb haben sich einige Resultate im Vergleich zu einer früheren, vom BAFU in Auftrag gegebenen Ökobilanz (treeze, 2018), deutlich verändert. Der vorliegende Fachbericht fasst die aktuellen Aktivitäten des BAFU bezüglich der Erhebung von Datensätzen zur Bewertung der Umweltauswirkung von Personenwagen mit verschiedenen Antriebssystemen zusammen. Er zeigt die – unter

<sup>2</sup> Der mittlere Besetzungsgrad liegt bei 1.6 Personen pro Fahrzeug.

Berücksichtigung der neusten verfügbaren Daten und Erkenntnissen – getroffenen Annahmen und Modellierungen auf. Zudem werden in den Kapiteln 3.5 und 4.4 zukünftige Entwicklungspotenziale abgeschätzt, um aufzuzeigen, wie die Umweltauswirkungen künftig weiter verringert werden können.

Hinweis:

**Anpassung der Fahrzeugeigenschaften und des Strommix in der Excel-Tabelle unter «mobitool.ch»**

Unter [www.mobitool.ch](http://www.mobitool.ch) steht eine detaillierte Excel-Tabelle für den Vergleich von Umweltauswirkungen von Verkehrsmitteln zur Verfügung. Die Tabelle basiert auf den Inventaren, die auch diesem Bericht zu Grunde liegen. Durch die Eingabe spezifischer Parameter (z.B. Lebensfahrleistung) können angepasste Einzelfahrzeugbetrachtungen vorgenommen werden.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Ökobilanzierung als Methode zur Analyse der Belastung der Umwelt

Die Ökobilanzierung ist eine Methode, mit der sich Umweltwirkungen erfassen, beurteilen und bewerten lassen. Eine typische Anwendung ist die Produktbilanz. Sie legt den Fokus auf den gesamten Lebensweg eines Produktes, von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung und den Gebrauch bis hin zur Entsorgung am Ende der Nutzungsphase inkl. der Transporte über den gesamten Lebensweg. Die Ökobilanz erfasst innerhalb des gesteckten Untersuchungsrahmens den Verbrauch an Energie und Ressourcen sowie den Ausstoss von Schadstoffen in Luft, Wasser und Boden sowie den Lärm.

Eine Produkt-Ökobilanz besteht gemäss ISO-Normen 14040/44 aus vier Phasen (Abbildung 3):

- In der ersten Phase werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen der gewünschten Analyse festgelegt.
- In der zweiten Phase werden die Daten zu den Stoff- und Energieflüssen, die auf dem Lebensweg des betrachteten Produkts eine Rolle spielen, zusammengetragen. Dieses oft umfangreiche Inventar wird auch **Sachbilanz** genannt.
- In der dritten Phase, der Wirkungsabschätzung, werden die Auswirkungen der Schadstoffemissionen und der Ressourcennutzung ermittelt und bewertet. In der Praxis existieren verschiedene Methoden zur Bewertung der Sachbilanzdaten, jede mit ihren eigenen Charakteristika, Stärken und Schwächen.
- In der vierten Phase, der Auswertung, werden die Ergebnisse und die zugrundeliegenden Modelle und Daten kritisch hinterfragt und die Stabilität der Ergebnisse durch Sensitivitätsanalysen überprüft. Zum Schluss werden die Ergebnisse interpretiert. Dabei werden in vielen Fällen die Phasen zwei und drei mehrmals in einem iterativen Prozess durchlaufen.

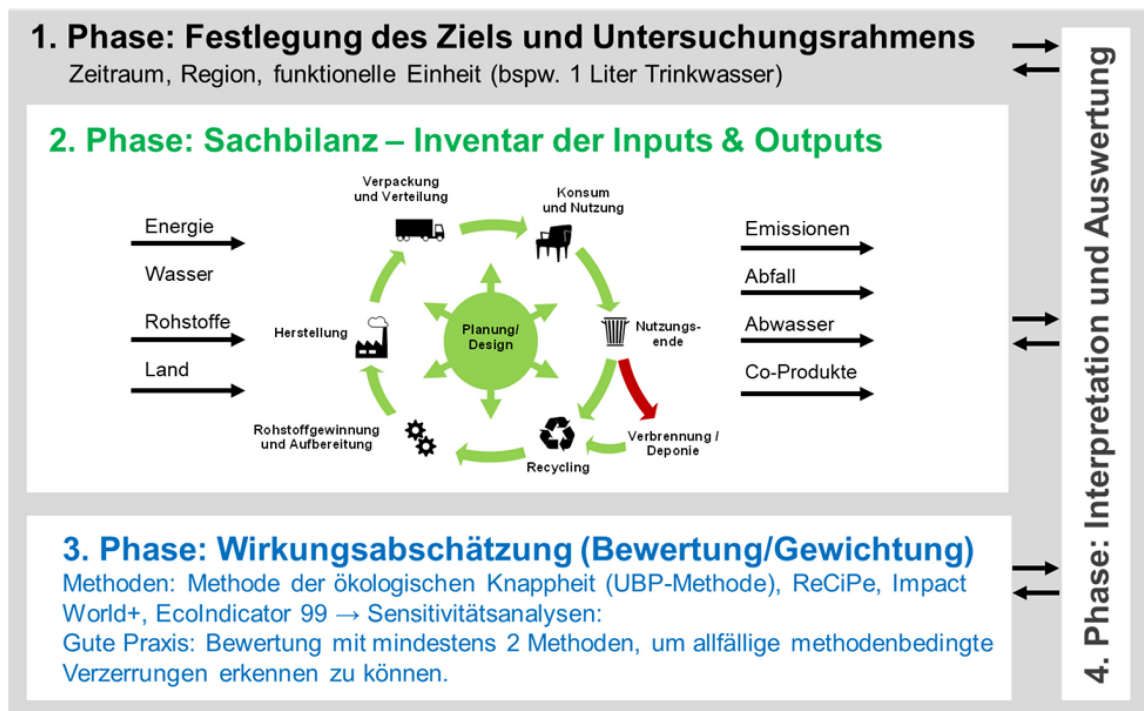


Abbildung 3: Die 4 Phasen einer Ökobilanz angepasst nach ISO 14040.



## 2.2 Wirkungsabschätzung im Rahmen der Ökobilanzierung mit der Methode der ökologischen Knappheit

Es existieren mehrere Methoden, mit denen sich im Rahmen einer Wirkungsabschätzung die Auswirkungen von Schadstoffemissionen und Ressourcennutzungen bewerten lassen. Eine in der Schweiz besonders gebräuchliche Methode ist jene der ökologischen Knappheit (MÖK), auch als UBP-Methode bezeichnet. Die aktuelle Version ist die UBP-Methode 2021 (BAFU, 2021).

Die Methode der ökologischen Knappheit erlaubt es, ein breites Spektrum an Umweltbelastungen zu berücksichtigen. Die zentrale Grösse der Methode sind Ökofaktoren, welche die Umweltbelastung einer Schadstoffemission oder einer Ressourcennutzung in Umweltbelastungspunkten (UBP) pro Mengeneinheit angeben. Der Ökofaktor eines Stoffes wird nach dem Prinzip distance-to-target berechnet. Dabei werden die Schutzziele der Umweltschutzgesetzgebung (Zielgrössen) und die aktuellen Emissionen und Ressourcenverbräuche ins Verhältnis zueinander gesetzt. Je grösser die Differenz zwischen den aktuellen Emissionen und dem Schutzziel, desto höher der sogenannte Gewichtungsfaktor - und damit schliesslich auch der Ökofaktor einer Schadstoffemission oder einer Ressourcennutzung. Die Daten zu den aktuellen Emissionen stammen aus nationalen Statistiken sowie aus Datenbanken der Umweltbeobachtung. Die jeweiligen Schutzziele der Umweltschutzgesetzgebung sind auf wissenschaftlichen Konsens abgestützt, werden aber auch von der Politik beeinflusst. Grundsätzlich bewertet die UBP-Methode Umweltbelastungen im Ausland so, wie wenn sie im Inland verursacht würden. Damit wird verhindert, dass durch Inlandnachfrage hervorgerufene Umweltbelastungen im Ausland heruntergespielt werden. Auf der anderen Seite gibt es Situationen, in denen Ökosysteme im Ausland durch Ressourcennutzungen oder Emissionen wesentlich stärker betroffen sind als durch die identische Tätigkeit im Inland. In diesem Fall würde die UBP-Methode die Umweltbelastung im Ausland zu tief bewerten, wenn die Schweizer Ausprägung als Basis diene. Solche Situationen gibt es z. B. beim Wasserverbrauch in Regionen mit grosser Wasserknappheit und bei der intensiven landwirtschaftlichen und industriellen Landnutzung in Zonen mit ursprünglich sehr hoher Biodiversität. Idealerweise wird deshalb dort, wo die lokale ökologische Knappheit im Ausland grösser ist als im Inland, die Gewichtung regionalisiert. Für die genannten Beispiele gibt es bereits regional differenzierte Ökofaktoren. So ist es möglich, Produkte und Prozesse mit einer regional differenzierten Charakterisierung und einer Normierung und Gewichtung auf Verhältnisse im Inland zu beurteilen. Die Anzahl Umweltbelastungspunkte, die eine Emission oder eine Ressourcennutzung verursacht, wird berechnet, indem die mit der Sachbilanz erhobenen Emissions- oder Verbrauchsmengen mit dem entsprechenden Ökofaktor multipliziert werden. Zum Schluss fasst die UBP-Methode die Einzelergebnisse durch Vollaggregation in einer Kennzahl zusammen. Dabei steht eine tiefe Anzahl Umweltbelastungspunkte für eine geringe Umweltbelastung (Abbildung 4).

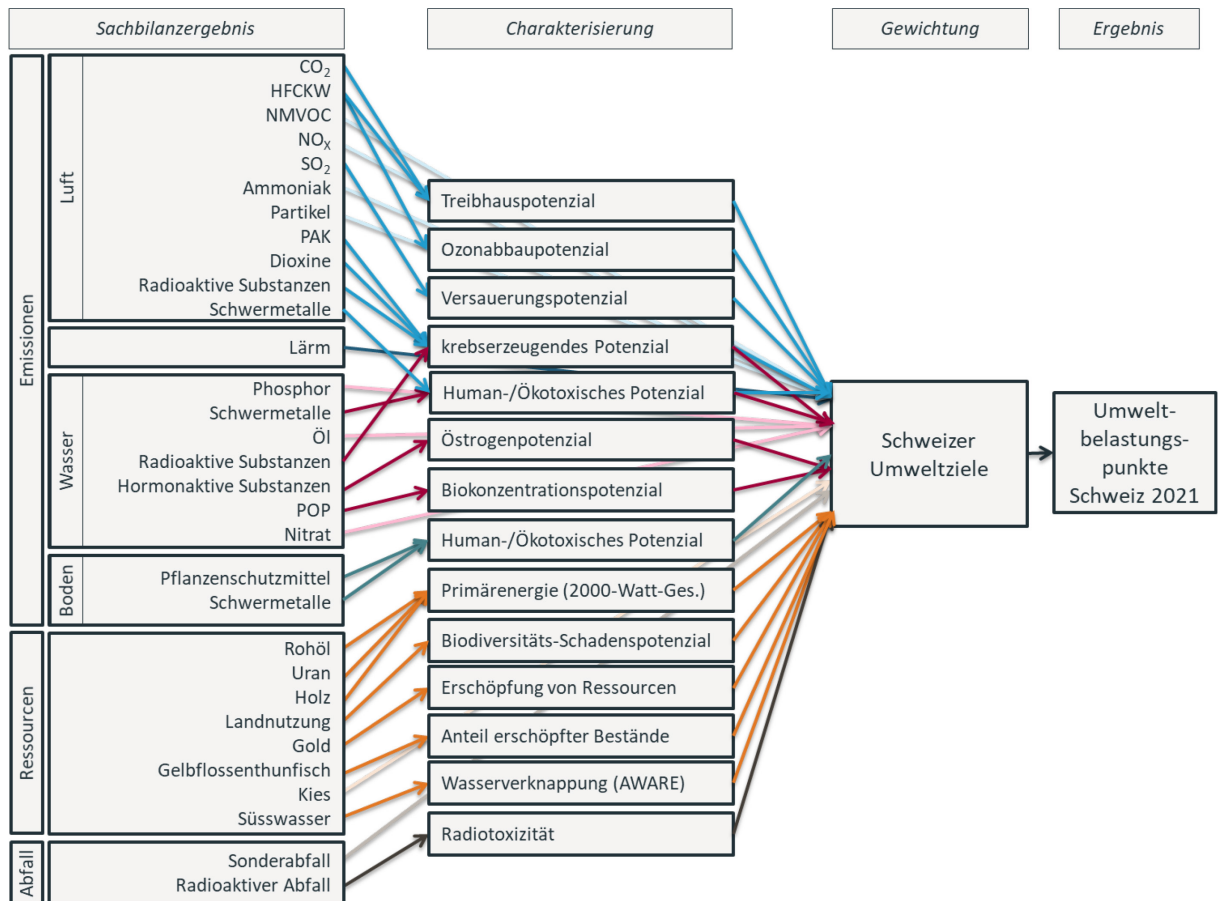


Abbildung 4: Ablaufschema und Inhalt der Methode der ökologischen Knappheit.

Die UBP-Methode 2021 ist in der Publikation «Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit» des BAFU im Detail beschrieben (BAFU, 2021). Im Unterschied zur UBP-Methode stützen sich andere Methoden, z.B. Impact 2002+ oder ReCiPe 2018, auf einen schadensorientierten Ansatz. Da beide Ansätze ihre Berechtigung sowie Stärken und Schwächen haben, empfiehlt das BAFU, wann immer möglich, zwei unterschiedliche Bewertungsmethoden anzuwenden, um die Richtungssicherheit und Interpretation der Resultate zu stützen bzw. zu verbessern. Im vorliegenden Bericht findet sich der Vergleich der Bewertungsmethoden in Kapitel 4.3.

## 2.3 Grundlagen für die Bilanzierung der Umweltauswirkungen von Personenwagen mit verschiedenen Antriebssystemen

### 2.3.1 Hintergrunddatenbestand für die Ökobilanzierung

Die für diesen Bericht verwendeten Hintergrunddatensätze für die Ökobilanzierung entstammen dem UVEK Ökobilanzdatenbestand 2018 (UVEK Datenbestand, 2018). Der Datenbestand kann unter Dateien/Files der ecoinvent v2-Webseite (<https://db.ecoinvent.org/index.php>) unter der Bezeichnung «UVEK\_DQRv2\_2018» bezogen werden. Allerdings ist dafür eine ecoinvent Lizenz nötig. Die Inventardaten für Personenwagen wurden in den Jahren 2021-22 im Auftrag des BAFU durch das Paul Scherrer Institut (PSI) aktualisiert und wo nötig ergänzt. Die neuen Inventardaten wurden zudem einer kritischen Prüfung unterzogen. Die für die Aktualisierung verwendeten Datenquellen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Modellierung der aktuellen Fahrzeuge ist im Bericht *Life cycle inventories for on-road vehicles* (Sacchi & Bauer, 2021) zu finden. Die Modellierung der zukünftigen Fahrzeuge ist im Bericht *Prospective life-cycle inventories for passenger cars in Switzerland* (Sacchi R. B., 2022) beschrieben. Der Hintergrunddatenbestand beinhaltet auch ein Inventar zum Verbraucher-Strommix, der vor allem bei den BEV und den FCEV eine wichtige Rolle spielt. Da sich der Verbraucher-Strommix

über die letzten Jahre hinweg verändert hat, wurde der im Datenbestand UVEK:2018 verwendete Mix durch den zum Zeitpunkt der Auswertung neusten als Lebenszyklusinventar (LCI) verfügbaren Verbraucher-Strommix Schweiz ersetzt (siehe Kapitel 2.3.5 Unterkapitel Antriebsenergie).

### 2.3.2 Ziel und Untersuchungsrahmen

Ziel der Arbeiten, welche die Basis für diesen Bericht bilden, ist es, transparente und frei verfügbare Grundlagen für die Bewertung der Umweltauswirkungen von Personenwagen mit verschiedenen Antriebssystemen zu schaffen. Der vorliegende Bericht dient der Darstellung der Aktualisierung in den Bereichen Energie, Umweltbelastung und Treibhausgase. Darüber hinaus werden die Second-Life-Batterienutzung, die Rezyklierung bzw. mögliche Entwicklungen in der Bereitstellung der Antriebsenergie und der Herstellung der Batterien in der Zukunft betrachtet. Im Rahmen dieser Arbeiten wurden auch die Inventare für Busse und Lastwagen überarbeitet. Diese werden im vorliegenden Bericht nicht abgebildet, sind jedoch ebenfalls frei verfügbar. Alle in diesem Bericht erwähnten Inventardaten werden unter [www.mobitool.ch](http://www.mobitool.ch) und/oder in Form der LCI verfügbar gemacht.

Die erstellten Lebenszyklusinventare (LCI) berücksichtigen den Lebenszyklus von der Wiege bis zur Bahre (Cradle-to-Grave). Sie umfassen die folgenden Phasen des Lebenszyklus einer Transportdienstleistung:

- die Herstellung des Fahrzeugs
- die Nutzung und Wartung des Fahrzeugs, einschliesslich der Versorgung mit Treibstoff bzw. der Bereitstellung der nötigen Antriebsenergie
- den Bau und die Instandhaltung der Strasse und der zugehörigen Infrastruktur
- die Entsorgung des Fahrzeugs, seine Demontage und die Behandlung seiner Bestandteile.

Die funktionale Einheit für individuelle Verkehrsmittel (z.B. Fahrräder, Scooter und Autos) ist ein Fahrzeugkilometer. Die funktionale Einheit für kollektive Verkehrsmittel (z. B. Stadt- und Reisebusse) ist ein Personenkilometer.

Die technische Systemgrenze umfasst folgende Aspekte, wobei die **fett markierten** Bereiche ganz (Fahrzeuge) bzw. teilweise (Energiebereitstellung) Teile der vom PSI aktualisierten und neu erstellten Inventare sind. Alle weiteren Aspekte werden mit den Daten des Hintergrunddatenbestands UVEK:2018 abgebildet.

- die Gewinnung und Umwandlung von Energie und Materialien, die für die Herstellung und Montage von Fahrzeugkomponenten benötigt werden.
- **die Herstellung der Fahrzeugkomponenten und Fahrzeuge;**
- **die Nutzung und Wartung des Fahrzeugs, einschliesslich der gesamten Energiekette;**
- der Bau und die Instandhaltung der Strasse und der dazugehörigen Infrastruktur;
- **die Demontage des Fahrzeugs und die Lieferung von Materialfraktionen an verschiedene Abfallbehandlungswege.** Die Umweltvorteile bei Verwendung von recyceltem Material ist in den Berechnungen berücksichtigt.

Zeitlich umfasst die Systemgrenze sowohl die Gegenwart als auch die zukünftige Situation. Für die Gegenwart wurde als Referenzjahr für die aktualisierten und erstellten Inventare das Jahr 2021 festgelegt. Die Inventare für die potenziellen zukünftigen Situationen sind für die Jahre 2030, 2040 und 2050 erstellt worden. Basierend auf den «Energieperspektiven Schweiz 2050+» wird dabei zwischen den zwei Hauptszenarien «Weiter Wie Bisher» (WWB) und «Netto-Null-Basis» (ZERO-Basis) unterschieden. Zusätzliche Fahrzeugvarianten wurden erstellt, um potenziell kritische Aspekte des Lebenszyklus des Fahrzeugs darstellen zu können (z.B. höhere Kilometerleistung, Wiederverwendung der Batterie). Geographisch umfasst die Systemgrenze die Schweiz (Fahrzeugnutzung, Energiebereitstellung), Europa (Fahrzeugherstellung, Batterieherstellung, Energiebereitstellung), Asien (Batterieherstellung) und die in den Hintergrundinventaren festgelegten Herkünfte.

### 2.3.3 Wirkungsabschätzung

Für die Wirkungsabschätzung stehen verschiedene Methoden und Ansätze zur Verfügung. Je nach Ansatz findet die Wirkungsabschätzung auf Stufe der Wirkungs- (Midpoint), der Schadens-kategorie (Endpoints) oder basierend auf einem distance-to-target Ansatz statt. Die Präsentation der Ergebnisse kann einzeln je Kategorie oder aggregiert, bis hin zu einer Vollaggregation (Single Score) erfolgen. Im Rahmen dieses Berichtes wird die vollaggregierende Methode der ökologischen Knappheit verwendet, da sie die aktuellen Emissionen und Ressourcenverbräuche in der Schweiz ins Verhältnis zu den Schutzziele der Umweltschutzgesetzgebung (Zielgrössen) setzt (siehe Kapitel 2.2). Daneben werden aufgrund ihrer Bedeutung im Verkehrsbereich auch die beiden Wirkungskategorien Treibhausgaspotenzial (IPCC, 2013) und der kumulierter Energieaufwand (KEA) (ecoinvent report No. 3, 2010) dargestellt. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse zum Einfluss der Methodenwahl (Kapitel 4.3) wird zudem die vollaggregierenden Methode Impact2002+ (Jolliet, et al., 2003) verwendet.

### 2.3.4 Datenquellen für die Modellierung der aktuellen Fahrzeuge

Für die Aktualisierung der Fahrzeuginventare konnte auf verschiedene Datenquellen zurückgegriffen werden. Die wichtigsten sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Weitere Angaben können Sacchi (2021) entnommen werden.

Tabelle 1: Für die Erstellung der Fahrzeuginventare verwendeten Datenquellen

Titel/Name	Quelle	Verwendung
UVEK:2018	BAFU	Hintergrunddaten Vorprozesse
Handbook of Emission Factors (HBEFA)	INFRAS	Validierung Emissionsfaktoren
Energieperspektiven 2050+	BFE	Energiemixe
Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019	Europäische Umweltagentur (EEA)	Emissionsfaktoren Verbrennungsmotoren
Vehicle Energy Consumption Calculation Tool - VECTO	Europäische Kommission	Energieverbrauch
“Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios”	(Cox, Bauer, Mendoza Beltran, van Vuuren, & Mutel, 2020)	Fahrzeugkomponenten und Aufbau, Einsatzparameter
“When, where and how can the electrification of passenger cars reduce greenhouse gas emissions?”	(Sacchi, Bauer, Cox, & Mutel, 2022)	Fahrzeugkomponenten und Aufbau, Einsatzparameter

### 2.3.5 Modellerte Fahrzeugkategorien und Fahrzeuge

Die Kategorisierung der Fahrzeuge und die erstellten Fahrzeuginventare sind im Detail in Sacchi (2021) beschrieben. Darin eingeflossen ist eine Datenerhebung zu sogenannten Steckerfahrzeugen des BAFU in Zusammenarbeit mit AutoSchweiz von 2021 im Rahmen der «Roadmap Elektromobilität 2022» (Massnahme 60). Nachfolgend wird ein Überblick über die wichtigsten Punkte gegeben.

#### Kategorisierung der Fahrzeuge

Die Kategorisierung der Fahrzeuge ist an die von der EU-Kommission definierten Fahrzeugsegmente angelehnt, wobei die EU-Kategorien «Mini» und «Small» in der Kategorie «Kompaktklasse» zusammengefasst und mittelgrosse SUV der Kategorie «Oberklasse» zugeordnet sind (Tabelle 2).

Tabelle 2: Fahrzeugkategorien nach (Sacchi & Bauer, 2021), Elektrofahrzeuge sind in Spalte «Beispiele» fett markiert

EU-Segment		Bezeichnung	Fläche (m <sup>2</sup> )		Leergewicht (kg)		Beispiele
	Definition		von	bis	von	bis	
L7e	Micro cars/Heavy quadricycles	<b>Mikro</b>		3.4	400	600	<b>Microlino</b> <b>Renault Twizy,</b>
A, B	Mini and Small cars	<b>Kompakt- klasse</b>	3.5	3.8	900	1'350	Dacia Spring <b>Fiat 500 (e)</b> Renault Clio <b>Renault Twingo (e)</b> <b>Renault Zoé ZE40</b> Toyota Yaris, VW Polo,
C	Medium cars	<b>Mittel- klasse</b>	3.8	4.4	1'250	1'750	Audi A4 <b>Hyundai Kona electric</b> Mercedes-Benz A-Klasse <b>Renault Zoé ZE50</b> Skoda Octavia <b>Tesla Model 3 SR+</b> Volvo XC40 VW Golf <b>VW ID.3</b>
D, J	Large cars and medium-size Sport utility cars	<b>Ober- klasse</b>	4.4		1'450	2'000	BMW 5er <b>Tesla Model 3 LR</b> Mercedes-Benz E-Klasse <b>Skoda Enyaq iV60</b> VW Tiguan
J	Sport utility cars	<b>Ober- klasse SUV</b>	6		2'000	2'500+	<b>Audi e-tron</b> Audi Q7 BMW X7 Mercedes-Benz GLS <b>Skoda Enyaq iV80</b>

### Berücksichtigte Antriebe

Für die Ökobilanzierung ist die Masse der Fahrzeuge beziehungsweise der einzelnen Komponenten und Materialien relevanter als die Einteilung in Fahrzeugkategorien. Aus diesem Grund ist für die Abschätzung der Umweltbelastung eines bestimmten Fahrzeugs auf das Gewicht und nicht auf das Erscheinungsbild zu achten. BEV, bei welchen dasselbe Modell mit unterschiedlichen Batteriegrössen angeboten wird, können deshalb für die Ökobilanzierung je nach Ausführung einer anderen Kategorie entsprechen. Beispiele hierzu sind: Renault Zoé, Tesla Model 3, Skoda Enyaq (Tabelle 2). Für jede Kategorie (ausser «Mikro») wurden Fahrzeuge mit unterschiedlichen Antriebstechnologien modelliert. Für die Kategorien «Kompakt», «Mittelklasse», «Oberklasse» und «Oberklasse SUV» sind dies jeweils:

- Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor bzw. Internal Combustion Engine (ICE): Benzin, Diesel, Erdgas
- Fahrzeuge mit Hybridantrieb bzw. Hybrid Electric Vehicles (HEV): Benzin, Diesel
- Plug-In Hybrid bzw. Plug-In Hybrid Vehicles (PHEV): Benzin oder Diesel und Strom
- Batterieelektrische Fahrzeuge bzw. Battery Electric Vehicles (BEV): Strom
- Brennstoffzellenfahrzeuge bzw. Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV): Wasserstoff

Für die Kategorie «Mikro» wurde nur ein BEV modelliert.

### Modellierte Fahrzeuge

Die für den vorliegenden Bericht relevantesten Annahmen bezüglich der Fahrzeugkategorien und Fahrzeuge sind in Tabelle 3 festgehalten. Die Tabelle beinhaltet alle Fahrzeuge, die grafisch im Bericht dargestellt sind.

Tabelle 3: Relevante Annahmen pro Fahrzeugkategorie (Sacchi & Bauer, 2021)

Kategorie	Treibstoff	Antrieb (Batteriechemie)	Leergewicht (kg)	Batterie-Kapazität (kWh)	Verbrauch (in Liter Benzin/Diesel bzw. kg Gas; kWh pro 100 km; el. Fahranteil (UF) in %)			Verbrauch (Energie in MJ) (MJ/100km)	Fahrleistung (km)
					(l bzw. kg /100km)	(kWh/100km)	(%)		
Mikro	Strom	BEV (NCA)	528	17	-	10.7	100	38.6	60'000
Kompakt	Benzin	ICE	1180	-	5.3	-	-	168.5	200'000
	Benzin	PHEV	1308	7	2.7	8.2	47	116.7	200'000
	Diesel	ICE	1216	-	4.0	-	-	142.5	200'000
	Diesel	PHEV	1293	7	2.3	8.2	47	112.0	200'000
	Strom	BEV (NCA)	1284	40	-	16.1	100	58.0	200'000
Mittelklasse	Benzin	ICE	1373	-	6.2	-	-	197.2	200'000
	Benzin	HEV	1445	2	5.4	-	-	171.2	200'000
	Benzin	PHEV	1438	10	3.2	8.7	47	132.0	200'000
	Diesel	ICE	1428	-	4.8	-	-	174.1	200'000
	Diesel	HEV	1425	2	3.9	-	-	142.8	200'000

	Diesel	PHEV	1432	10	2.7	8.7	47	131.7	200'000
	Gas	ICE	1364	-	4.6	-	-	220.7	200'000
	H2	FCEV	1447	- <sup>3</sup>	1.0	-	-	121.5	200'000
	Strom	BEV (LFP)	1538	43	-	18.0	100	64.8	200'000
	Strom	BEV (NCA)	1538	52	-	18.0	100	64.8	200'000
	Strom	BEV (NMC)	1538	46	-	18.0	100	64.8	200'000
Ober- klasse	Benzin	ICE	1788	-	8.4	-	-	264.9	200'000
	Benzin	PHEV	2021	17	4.3	10.8	47	174.3	200'000
	Diesel	ICE	1815	-	6.5	-	-	236.4	200'000
	Diesel	PHEV	2008	17	3.9	10.8	47	182.5	200'000
	Strom	BEV (NCA)	1909	83	-	20.7	100	74.5	200'000
Ober- klasse SUV	Benzin	ICE	2120	-	9.7	-	-	308.5	200'000
	Benzin	PHEV	2355	16	4.9	12.5	47	201.6	200'000
	Diesel	ICE	2149	-	7.8	-	-	286.2	200'000
	Strom	BEV (NCA)	2215	95	-	24.0	100	86.4	200'000

### Antriebsenergie

Hinsichtlich der Antriebsenergie werden die handelsüblichen Energieträger betrachtet, d.h. bei den fossilen Treibstoffen wird von einem biogenen Anteil von 2.6 % (Benzin), 5.9 % (Diesel) und 27.3 % (Gas) ausgegangen. Berücksichtigt wurde auch, dass in der Schweiz aufgrund der für die Steuererleichterung für biogene Treibstoffe einzuhaltenden ökologischen Anforderungen im Strassenverkehr lediglich biogene Treibstoffe aus Abfällen und Rückständen eingesetzt werden.

Als Ladestrom wird der Verbraucher-Strommix (basierend auf Produktion und kommerziellem Handel) mit Daten von 2018 genutzt (Frischknecht, 2021). Dieser Strommix wird auch in der aktualisierten KBOB-Empfehlung 2009/1:2022 verwendet und als Datengrundlage für den durchschnittlichen Strom ab Schweizer Steckdose empfohlen. Er ersetzt den Verbraucher-Strommix aus dem UVEK Ökobilanzdatenbestand 2018 (UVEK:2018), der als Referenzjahr 2014 hat <sup>4</sup>. Der Verbraucher-Strommix setzt sich wie in Tabelle 4 gezeigt zusammen. Daneben wird auch die Verwendung des «Durchschnittlichen Stromprodukts aus erneuerbaren Energien» (im Weiteren als erneuerbarer Strom bezeichnet) betrachtet. Dieser ist ebenfalls in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

<sup>3</sup> FCEV verfügen über eine mit HEV vergleichbare Batterie, was in der Modellierung nicht berücksichtigt wurde (S.a. Sacchi (2021), S. 72)

<sup>4</sup> Der in der Energieetikette für Personenwagen Umweltkennwerte 2022 der Strom- und Treibstoffbereitstellung verwendet Verbraucher-Strommix war zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes noch nicht verfügbar. Er weist mit 108 g CO<sub>2</sub>-Äq./kWh niedrigere Treibhausgasemissionen auf als der in diesem Bericht verwendete Verbraucher-Strommix (130 g CO<sub>2</sub>-Äq./kWh). Die Auswirkungen auf das Ergebnis pro Fahrzeugkilometer liegen bei BEV im niedrigen einstelligen Prozentbereich, daher wurde auf eine Anpassung verzichtet (BFE, 2022).

Tabelle 4: Verbraucher-Strommix Schweiz 2018 und erneuerbarer Strom, basierend auf der Integration der Stundenwerte von Produktion und kommerziellem Handel (Frischknecht, 2021).

Technologie	Verbraucher-Strommix CH		Erneuerbarer Strom
	Anteile	davon Inland	
Braunkohle	2.6 %	0.0 %	
Steinkohle	2.3 %	0.0 %	
Erdgas	4.1 %	0.0 %	
übrige Fossile	1.1 %	0.5 %	
Kernenergie	39.9 %	19.6 %	
Pumpspeicherkraftwerke	3.2 %	2.1 %	
Biomasse	2.8 %	1.5 %	0.64 %
Wasserkraft	34.9 %	28.5 %	96.72 %
Windkraft	4.9 %	0.1 %	1.70 %
Photovoltaik	3.0 %	1.7 %	0.93 %
Abfall	1.3 %	0.9 %	
<b>Total</b>	<b>100.0 %</b>	<b>55.0 %</b>	<b>100.0 %</b>

Die Umweltauswirkungen des in den Inventaren verwendeten Stromes sind für die einzelnen Stromproduktionstechnologien bzw. den Mix in der Tabelle 5 aufgeführt. Die Umweltauswirkung von Strom aus der Photovoltaik (PV) ist als zu hoch anzusehen. Laut der vor kurzem veröffentlichten KBOB Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022 liegen die THG-Emissionen für Strom aus PV von einem Schrägdach in der Schweiz bereits heute bei 27 - 43 g CO<sub>2</sub>-Äq./kWh, wenn der Strom am Standort erzeugt wird, beziehungsweise 37 - 55 g CO<sub>2</sub>-Äq./kWh, wenn der PV Strom über das Netz bezogen wird. Diese Daten konnten für die hier beschriebenen Arbeiten nicht berücksichtigt werden. Der Einfluss auf einen Fahrzeugkilometer ist allerdings als sehr gering einzuschätzen (als Vergleich siehe Abbildung 15 BEV geladen mit Photovoltaik vs. BEV geladen mit Strom aus Windkraft). Die für 2023 vorgesehene Aktualisierung des UVEK-Datenbestandes wird auf den KBOB Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022 aufbauen und somit die neusten Inventare zur Photovoltaik beinhalten.

Tabelle 5: Umweltbelastung in UBP, Emission von Treibhausgasen und kumulierter Energieaufwand des in den Inventaren verwendeten Stromes pro kWh je nach Produktionstechnologie bzw. Mix

Arten der Stromproduktion	UBP/kWh	CO <sub>2</sub> -Äq./kWh	MJ/kWh
2021			
Strom, ab Windkraft Schweiz <sup>5</sup>	48	17	4.1
Strom, ab PV Schweiz	162	80	5
Strom, ab Kernkraftwerk Schweiz	567	15	13.7
Strom, ab Gaskraftwerk	782	647	10.9
Strom, ab Wasserkraft Schweiz	19	5	3.8
Erneuerbarer Strom	78	14	4.3
Verbraucher-Strommix	388	130	8.3

### Besonderheit Plug-In-Hybride

Alle PHEV werden auch als Variante betrachtet, bei welcher die Fahrzeuge nie extern aufgeladen werden, um die Auswirkung des Ladeverhaltens abschätzen zu können. Der Einfluss der getroffenen Annahmen wird im Kapitel «4.2 Betrachtung spezifischer Aspekte bei aktuellen Fahrzeugen» aufgezeigt.

<sup>5</sup> Inventar für Windstrom entspricht einer Erzeugung durch eine Anlage mit ~600 kW.



## 2.4 Grundlagen für die potenziellen technischen Entwicklungen bei Personenwagen

Um die zukünftige Entwicklung der Fahrzeuge in die Betrachtung einfließen lassen zu können, wurden Fahrzeuge für die Jahre 2030, 2040 und 2050 in zwei Hauptszenarien modelliert. Dabei wird unterschieden zwischen einer eher konservativen Einschätzung des technologischen Fortschritts (WWB) und einer optimistischeren (ZERO-Basis). Angetrieben werden diese Fahrzeuge mit den Energieträgern bzw. den Strommixen, die laut Energieperspektiven 2050+ (BFE, 2021) in den entsprechenden Jahren in den Szenarien WWB und ZERO-Basis vorliegen werden. Neben der Zusammensetzung der Treibstoffe und des jeweiligen Strommix bestimmen die Hauptszenarien für BEV und synthetische Treibstoffe auch den Herstellungsort sowie bei BEV das Gewicht der Batterie (siehe Tabelle 6). Die getroffenen Annahmen sind im Detail in Sacchi (2021) beschrieben. Nachfolgend wird ein Überblick über die wichtigsten Punkte gegeben. Nicht berücksichtigt werden konnte der technische Fortschritt und der vermehrte Einsatz von erneuerbaren Energien in den Vorketten, z.B. in den Bereichen Ressourcenextraktion und Verarbeitung oder Bereitstellung von Anlagen zur Stromproduktion.

Tabelle 6: Unterschiede in den Hauptszenarien WWB und ZERO-Basis

	<b>WWB</b>	<b>ZERO-Basis</b>
Energiebereitstellung CH/international	Gemäss Energieperspektiven 2050+ (S. Anhang 7.3, Tabelle 28 und Tabelle 30)	Gemäss Energieperspektiven 2050+ (S. Anhang 7.3, Tabelle 29 und Tabelle 31)
Reduktion Batteriegewicht vs. 2021	2030: 0 % 2040: - 10 % 2050: - 20 %	2030: - 23 % 2040: - 47 % 2050: - 58 %
Energiemix Batterieherstellung (Herstellungsort Batterie)	Global	Europa
Anteil rezyklierter Stoffe (Li, Ni, Co) in der Batterie	2030: 0 % 2040: 0 % 2050: 0 %	2030: Li 5 %, Ni 4 %, Co 17 % 2040: Li 28 %, Ni 23 %, Co 67 % 2050: Li 28 %, Ni 23 %, Co 67 %
Anteil Bioethanol Benzin	2030: 1 % 2040: 1 % 2050: 1 %	2030: 6.5 % 2040: 7 % 2050: 7 % (+93 % synth.)
Anteil Biodiesel	2030: 2 % 2040: 2 % 2050: 2 %	2030: 1.9 % 2040: 6.4 % 2050: 21.2 % (+78.8 % synth.)

### Datenquellen für die Modellierung der zukünftigen Fahrzeuge

Für die Modellierung der zukünftigen Fahrzeuge konnte auf verschiedene Datenquellen zurückgegriffen werden. Die wichtigsten sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Weitere Angaben können (Sacchi R. B., 2022) entnommen werden.

Tabelle 7: Für die Modellierung der Zukünftigen Fahrzeuge verwendete Datenquellen

	Datenquellen
Fahrzeugkomponenten, Fahrzeugdesign und Fahrzeuggrösse	(Cox, Bauer, Mendoza Beltran, van Vuuren, & Mutel, 2020) (Sacchi, Bauer, Cox, & Mutel, 2022)
Energieträger	Energieperspektiven 2050+ (BFE, 2021); Synthetische Treibstoffe: (Hank, et al., 2019), (van der Giesen, Kleijn, & Kramer, 2014), (Albrecht, Schmidt, Weindorf, Wurster, & Zittel, 2013)
Verbrauch	(Cox, Bauer, Mendoza Beltran, van Vuuren, & Mutel, 2020) (Sacchi, Bauer, Cox, & Mutel, 2022)
Emissionen Verbrennung	(HBEFA, 2021), (European Environment Agency, 2019)
Emissionen (weitere)	(European Environment Agency, 2019)
Nutzung	(Cox, Bauer, Mendoza Beltran, van Vuuren, & Mutel, 2020), (Sacchi, Bauer, Cox, & Mutel, 2022), (ASTRA, 2022)

In beiden Szenarien wird für alle Fahrzeuge eine Gewichtsreduktion durch Leichtbau angenommen. Diese liegt zwischen -13 % und -15 % im Vergleich zum Referenzjahr (2021)<sup>6</sup>. Bei den Verbrennungsmotoren wird bis 2030 eine Verbesserung der Antriebseffizienz um 1 % unterstellt, danach bleiben diese unverändert. Grund hierfür ist die Annahme, dass unter den aktuellen Voraussetzungen die Entwicklung von Verbrennungsmotoren für Personenwagen nicht weiter vorangetrieben wird. Für die anderen Antriebsarten werden auch für die Zeit nach 2030 leichte Verbesserungen in der Antriebseffizienz sowie für BEV und PHEV des Batteriegewichts angenommen. Die Entwicklung der Umweltwirkung von Personenwagen in den Hauptszenarien wird in Kapitel 3.5 aufgezeigt.

Zusätzlich zu den beiden Hauptszenarien werden ebenfalls Fahrzeuge modelliert, welche in Bezug auf kritische Parameter wie der Lebensfahrleistung verändert wurden. Diese Fahrzeuge sind nicht entsprechend einem Szenario modelliert, sondern dienen dazu, den Einfluss des spezifischen Parameters auf die Umweltwirkung der Fahrzeuge aufzuzeigen. Zu den bereits in den Hauptszenarien berücksichtigten Recyclingraten und Energiemixen stehen für die Sensitivitätsanalyse für das Jahr 2050 zusätzlich Inventare mit synthetischen Treibstoffen aus 100 % Photovoltaik bzw. 100 % Windkraft (Abbildung 13 und Abbildung 14) sowie mit einem Anteil rezyklierter Stoffe (Li, Ni, Co) in den Batterien von BEV von 100 % zur Verfügung (siehe Kapitel 4.4). Die untersuchten Parameter sind in Tabelle 8 aufgeführt. Für die Batterien von PHEV und BEV wurden zudem höhere Energiedichten der Batteriezellen modelliert. Dies wirkt sich jedoch nicht direkt auf die Umweltwirkung der Fahrzeuge aus, sondern ausschliesslich auf ihre elektrische Reichweite, und wird deshalb in diesem Bericht nicht weiter berücksichtigt<sup>7</sup>.

Tabelle 8: Untersuchte Parameter Zukunftsperspektiven

Parameter	Basis	Sensitivitätsanalyse
Erhöhung der Lebensfahrleistung der Fahrzeuge	200'000 km	300'000 km (+50 %)
Second-Life: Prozentsatz der Umweltbelastung der Batterie, welcher der Nutzung als Second-Life Batterie zugeordnet wird	0 %	50 %
Anteil synthetischer Treibstoffe bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren	0 %	100 %
Strommix (Ladestrom bzw. Herstellung synth. Treibstoffe)	WWB / ZERO-Basis	100 % Photovoltaik 100 % Wind
Anteil rezyklierter Stoffe (Li, Ni, Co) in der Batterie		100 %

<sup>6</sup> Die Gewichtsreduktion in Zukunft ergibt sich aus einem steigenden Anteil an Leichtbaumaterialien wie Aluminium an der Fahrzeugmasse. Nicht berücksichtigt hingegen sind andere das Fahrzeuggewicht beeinflussende Entwicklungen, beispielsweise bezüglich der Sicherheitsanforderungen oder der Kaufkraft (Sacchi & Bauer, 2021).

<sup>7</sup> In der Modellierung ist der maximal mögliche elektrische Fahranteil bei PHEV 75 %. Da dieser bereits 2030 erreicht wird, hat die höhere elektrische Reichweite in den Jahren 2040 und 2050 keinen Einfluss auf die Umweltwirkung, ausgedrückt in Fahrzeugkilometer, mehr.

Die höhere Lebensfahrleistung bedeutet einen längeren Einsatz des Fahrzeugs bis zur Entsorgung. Mit «Second-Life» ist die Weiterverwendung der Batterien von BEV und PHEV in einer anderen Funktion, beispielsweise als stationärer Energiespeicher, gemeint. Betrachtet wird die Auswirkung unterschiedlicher Allokationen der Umweltbelastung aus der Batterieherstellung auf die Zweitnutzung. Im Szenario ZERO-Basis sind die Treibstoffe für Verbrennungsmotoren im Jahr 2050 wie beschrieben ausschliesslich aus biogener oder synthetischer Herkunft.

### **Grenzen der Modellierung und Unsicherheiten**

Die Modellierung zukünftiger Fahrzeuge unterliegt naturgemäss einer hohen Unsicherheit. Für den vorliegenden Bericht wird versucht, diese durch Verwendung von Annahmen basierend auf bestehenden Prognosen, Modellierungen und Annahmen bzw. geplanten Vorgaben möglichst nicht zusätzlich zu vergrössern. Aus diesem Grund werden auch die Aspekte, für die keine konkreten Modellierungen aus anderen Quellen vorhanden waren, möglichst nicht in den Szenarien betrachtet, sondern in Sensitivitätsanalysen. Im Folgenden sind die wichtigsten Grenzen der Modellierung und der verwendeten Daten aufgeführt, die im Rahmen der Erstellung der Fahrzeuginventare nicht angegangen werden konnten:

- Es werden lediglich die Entwicklungspotenziale der Fahrzeuge im engeren Sinne betrachtet. Potenzielle Verbesserungen bei den Vorprozessen wie beispielsweise in der Stahlherstellung selbst oder des in der Stahlerzeugung verwendeten Energiemixes können nicht berücksichtigt werden. Die Umweltauswirkung der Fahrzeugherstellung in den Jahren 2030, 2040 und 2050 dürfte deshalb eher als konservative Einschätzung anzusehen sein.
- Für aktuelle ICE-Fahrzeuge wird der Energieverbrauch anhand der Fahrzeugdaten unter Verwendung des WLTP-Testzyklus berechnet und mit Messwerten validiert. Der Energieverbrauch im realen Fahrbetrieb kann bis zu 14 % höher sein (Dornoff, Tietge, & Mock, 2020). Der Energieverbrauch zukünftiger Fahrzeuge wird relativ zum aktuellen Stand abgeleitet, wobei für ICE-Antriebsstränge nur geringe Verbesserungen nach 2030 angenommen werden.
- Empirische Daten für die Lebensdauer von Batterien von BEV und PHEV fehlen. Für die vorliegende Arbeit wird davon ausgegangen, dass innerhalb der angenommenen Lebensdauer des Fahrzeuges kein Wechsel der Batterie notwendig ist. Es ist davon auszugehen, dass sich in den kommenden Jahren die Datenlage zur Lebensdauer der heute verwendeten Batteriezellentypen deutlich verbessern wird.
- Über die Materialzusammensetzung der Fahrzeuge und deren Herstellung in der Zukunft kann nur spekuliert werden. Die Umweltauswirkung der Herstellung des Fahrzeugs gewinnt jedoch umso mehr an Bedeutung, je grösser der Anteil der erneuerbaren Energieträger in der Antriebsenergie der Fahrzeuge ist.
- Die potenzielle Umweltauswirkung der synthetischen Treibstoffe wird erheblich von der Allokation in der Raffinierung des Rohmaterials bestimmt. Heute ist die Art und Weise der zukünftigen Herstellung, sowie die Mengen der in der Raffination erzeugten Produkte nicht vorhersehbar. Aus diesem Grund sind die verwendeten Allokationsfaktoren mit einer hohen Unsicherheit behaftet.

### 3 Resultate

Vorweg ist anzumerken, dass die in diesem Kapitel aufgeführten Ergebnisse für eine bestimmte Fahrzeugkategorie unter den getroffenen Annahmen gelten. Diese sind im vorhergehenden Kapitel übersichtsmässig zusammengestellt und können im Detail aus Sacchi (2021) entnommen werden. Personenwagen können jedoch sehr unterschiedlich genutzt werden, und da dies die Umweltauswirkung pro Fahrzeugkilometer wesentlich beeinflussen kann, ist, wann immer möglich, der entsprechende konkrete Einsatzbereich zu betrachten. Für diesen Zweck kann auf die Excel-Tabelle unter [www.mobitool.ch](http://www.mobitool.ch) zurückgegriffen werden.

#### 3.1 Vergleich verschiedener Antriebstechnologien

Für den Vergleich der Umweltbelastung der verschiedenen Antriebstechnologien werden jeweils neue Fahrzeuge (2021) der Mittelklasse verwendet (siehe Kapitel 2.3.5, Tabelle 2 und Tabelle 3). Der biogene Anteil liegt beim Benzin bei 2,6 %, beim Diesel bei 5,9 % und beim Gas bei 27,3 %. Als Strom zum Laden der Batterien wird der Verbraucher-Strommix von 2018 bzw. erneuerbarer Strom verwendet (siehe Kapitel 2.3.5, Tabelle 4 und Tabelle 5)<sup>8</sup>. Die Abbildung 5 zeigt die unter diesen Annahmen ermittelten Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen), die Umweltbelastungspunkte (UBP) sowie den kumulierten Energieaufwand (KEA) pro Fahrzeugkilometer (Fzkm). Die Balken sind zusätzlich nach den Elementen des Lebenszyklus unterteilt, um deren Anteil an den Emissionen bzw. der Umweltbelastung zu verdeutlichen. Dabei umfasst die Kategorie «Fahrzeug» den Rohstoff- und Energieverbrauch bei der Herstellung und der Entsorgung der Fahrzeuge; «Direkte Emissionen» sind alle während des Betriebs entstehenden Emissionen (inkl. Lärm und Abriebs-Emissionen<sup>9</sup>).

---

<sup>8</sup> Auf die Darstellung von rein mit biogenen Treibstoffen betriebenen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor wurde verzichtet, da nicht genügend nicht in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion stehende Rohstoffe verfügbar sind, um einen grösseren Anteil der Flotte mit 100% biogenen Treibstoffen zu betreiben.

<sup>9</sup>Kap. 15.1 (Lärm) bzw. 9.8 (Abrieb) im Bericht «Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit» (BAFU, 2021).

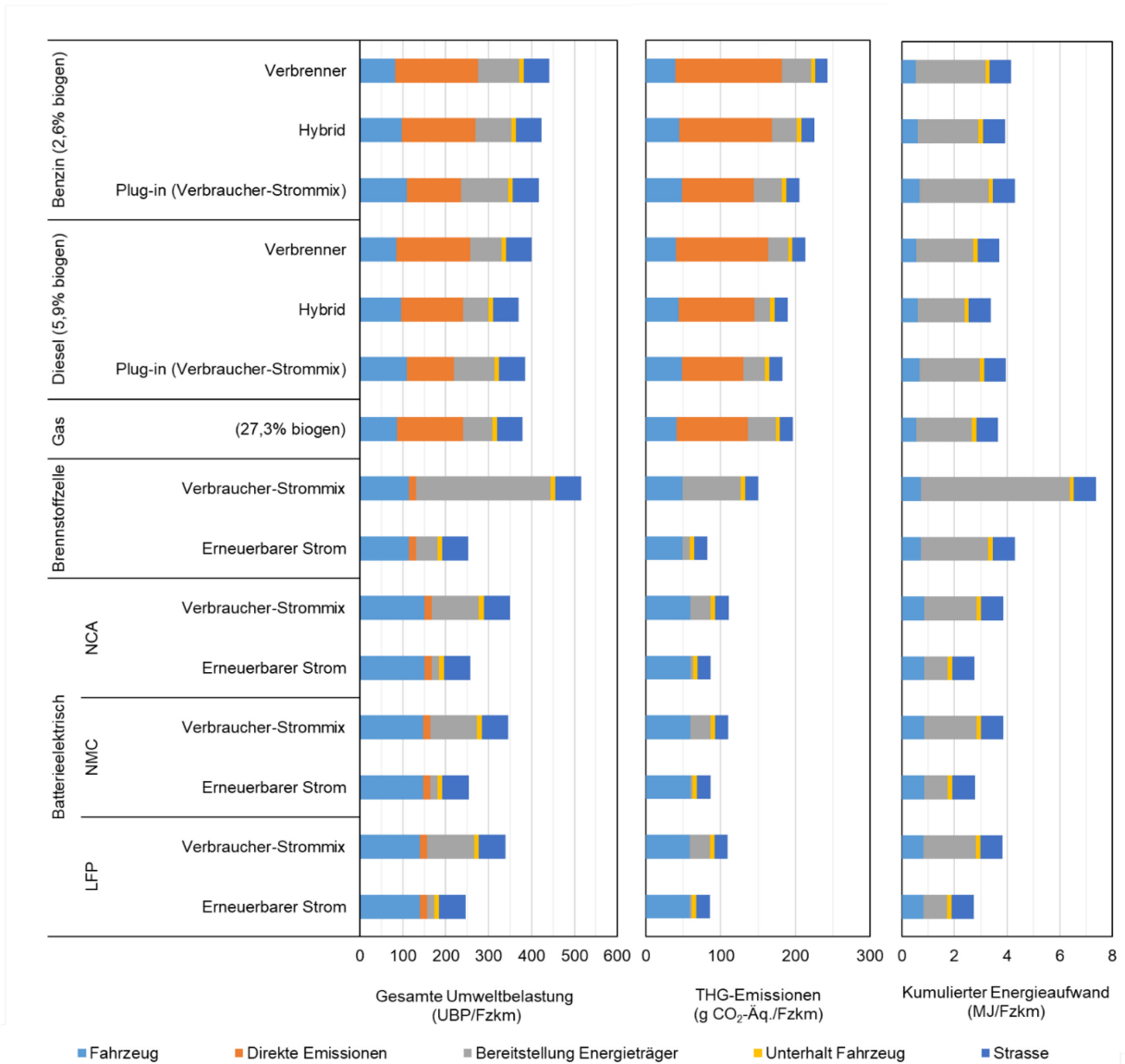


Abbildung 5: Einfluss der verschiedenen Antriebssysteme auf die gesamte Umweltbelastung, die Emission von Treibhausgasen und den kumulierten Energieaufwand pro Fahrzeugkilometer eines Mittelklasse Personenwagens (1250-1750 kg, Beispielfahrzeuge siehe Tabelle 2, Zahlenwerte siehe Tabelle 12).

Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10,7 % neue Erneuerbare 14,3 % andere. Importe insgesamt 45 %)

Erneuerbarer Strom (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare).

Hinweis: Die Umweltbelastung bestimmter Fahrzeuge sowie ein individueller Strommix können durch Eingabe der wichtigsten Parameter in der Excel-Tabelle unter [www.mobitool.ch](http://www.mobitool.ch) abgeschätzt werden.

NCA: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid

NMC: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid

LFP: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Eisenphosphat (LiFePO<sub>4</sub>)

Die **mittlere Spalte in Abbildung 5** zeigt die Treibhausgasemissionen (THG) in Gramm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Fahrzeugkilometer (Fzkm). Bei den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICE: Benzin, Diesel, Gas) dominieren die direkten THG-Emissionen aus der Verbrennung der fossilen Treibstoffe. Bei den rein mit Verbrennungsmotor angetriebenen Fahrzeugen stösst das Benzinfahrzeug am meisten THG aus (243 g CO<sub>2</sub>-Äq./Fzkm) gefolgt vom Dieselfahrzeug (213 g CO<sub>2</sub>-Äq./Fzkm) und dem Gasfahrzeug (196 g CO<sub>2</sub>-Äq./Fzkm). Zu beachten ist der hohe biogene Anteil beim Gasfahrzeug von 27,3 %. Die Hybridisierung bringt beim Benzinfahrzeug Einsparungen von 7 % (Hybrid) - 16 % (Plug-In-Hybrid), wobei das Ladeverhalten bei den Plug-In-Hybriden eine beträchtliche Auswirkung hat (siehe Kap. 4.2.2). Beim Dieselfahrzeug bringt die Hybridisierung

Einsparungen von 11 % (Hybrid) - 15 % (Plug-In-Hybrid). Das Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) liegt bei den THG-Emissionen etwas tiefer als der Diesel-Plug-In-Hybrid, wenn für die Erzeugung des Wasserstoffs der Verbraucher-Strommix verwendet wird (150 g CO<sub>2</sub>-Äq./Fzkm)<sup>10</sup>. Wird hingegen der erneuerbare Strom verwendet, verursacht das FCEV mit 82 g CO<sub>2</sub>-Äq./Fzkm die tiefsten THG-Emissionen und ist vergleichbar mit den BEV, die mit erneuerbarem Strom fahren (85 - 87 g CO<sub>2</sub>-Äq./Fzkm). Der grösste Teil der THG-Emissionen fällt hier bei der Fahrzeugherstellung an (69 %).

Das mit erneuerbarem Strom betriebene BEV mit einer LFP-Batterie liegt mit 85 g CO<sub>2</sub>-Äq./Fzkm um 65 % unter demjenigen mit den höchsten THG-Emissionen (Benzinfahrzeug). Wird dasselbe BEV mit dem Verbraucher-Strommix geladen, stösst es 55 % weniger THG-Emissionen aus als das Benzinfahrzeug. Aufgrund des höheren Wirkungsgrades von BEV ist der Unterschied zwischen den beiden betrachteten Strommischen weniger ausgeprägt als für FCEV.

Die **linke Spalte in Abbildung 5** zeigt die gesamte Umweltbelastung, gemessen in Umweltbelastungspunkten (UBP) pro Fahrzeugkilometer. Es ergibt sich ein vergleichbares, allerdings etwas weniger stark ausgeprägtes Bild wie bei den Treibhausgasemissionen. Die Ähnlichkeit rührt daher, dass die THG-Emissionen ein grosses Gewicht innerhalb der gesamten Umweltbelastung aufweisen (siehe auch Abbildung 6). Auffallend ist die im Vergleich zum Benziner um 17 % grössere Umweltbelastung des Brennstoffzellenfahrzeuges, wenn der Wasserstoff mit dem Verbraucher-Strommix hergestellt wird. Durch die Verwendung von erneuerbarem Strom kann die Umweltbelastung des FCEV soweit gesenkt werden, dass der Wert um 43 % geringer ist als derjenige des Benzinfahrzeugs, und damit das Niveau des mit erneuerbarem Strom betriebenen BEV erreicht. Dieses BEV (mit LFP-Batterie) weist mit 247 UBP/Fzkm die geringste Umweltwirkung aus, diese liegt um 52 % unter dem Brennstoffzellenfahrzeug (Verbraucher-Strommix), das mit 520 UBP/Fzkm die höchste Wirkung aufweist. Im Vergleich zum Benzinfahrzeug (442 UBP/Fzkm) ist die Umweltbelastung des BEV (mit LFP-Batterie und erneuerbarer Strom) um 44 % kleiner.

Die **rechte Spalte in Abbildung 5** zeigt den kumulierten Energieaufwand (KEA) in Megajoule (MJ) pro Fahrzeugkilometer. Auffallend ist die im Vergleich zu den BEV grosse Differenz bei den FCEV zwischen dem Betrieb mit erneuerbarem Strom und mit dem Verbraucher-Strommix. Dies ist auf den hohen Energiebedarf für die Elektrolyse von Wasserstoff und den etwa 100 % höheren kumulierten Energieaufwand des Verbraucher-Strommix zurückzuführen (vgl. Tabelle 5). Der kumulierte Energieaufwand des Fahrzeugs mit dem geringsten Bedarf, das mit erneuerbarem Strom betriebene BEV, beträgt 2.7 MJ/Fzkm und liegt damit 63 % unter demjenigen des Brennstoffzellenfahrzeugs (Verbraucher-Strommix), das mit 7.4 MJ/Fzkm den höchsten Bedarf aufweist. Im Vergleich zum Benzinfahrzeug (4.2 MJ/Fzkm) ist der kumulierte Energieaufwand des besten BEV (erneuerbarer Strom) um rund 34 % kleiner.

Der Einfluss der Batteriechemie (NCA, NMC, LFP) ist in allen drei Bereichen (Umweltbelastung, Treibhausgasemissionen und kumulierter Energieaufwand) gering.

In Abbildung 5 nicht abgebildet ist das mit erneuerbarem Strom betriebene PHEV. Im Vergleich zu dem mit dem Verbraucher-Strommix aufgeladenen PHEV weist es etwas tiefere THG-Emissionen (- 5 %) und eine tiefere Umweltbelastung (- 10 %) auf.

Die gesamte Umweltbelastung in UBP lässt sich auch aufgeteilt nach der Art der Wirkungskategorie darstellen. Die Fahrzeuge in Abbildung 6 entsprechen den in Abbildung 5 gezeigten, jedoch sind die Balken pro Fahrzeuge nicht nach den einzelnen Schritten im Lebenszyklus, sondern nach Wirkungskategorie unterteilt. Gezeigt werden die Themen Treibhausgasemissionen (THG), Luftschadstoffe (NO<sub>x</sub> und PM<sub>10</sub>), Verbrauch von Energieressourcen sowie mineralischer

<sup>10</sup> Die Wasserstoffproduktion wird nach (Zhang, 2017) modelliert, wobei ein Polymerelektrolytmembran-Elektrolyseur (PEM) verwendet wird. Der Strombedarf pro kg produzierten Wasserstoffs bei 25 bar beträgt 55 kWh.

Ressourcen, radioaktive Abfälle und in die Luft abgegebene Schwermetalle. Alle weiteren Umweltthemen sind in der Kategorie «Andere» zusammengefasst.

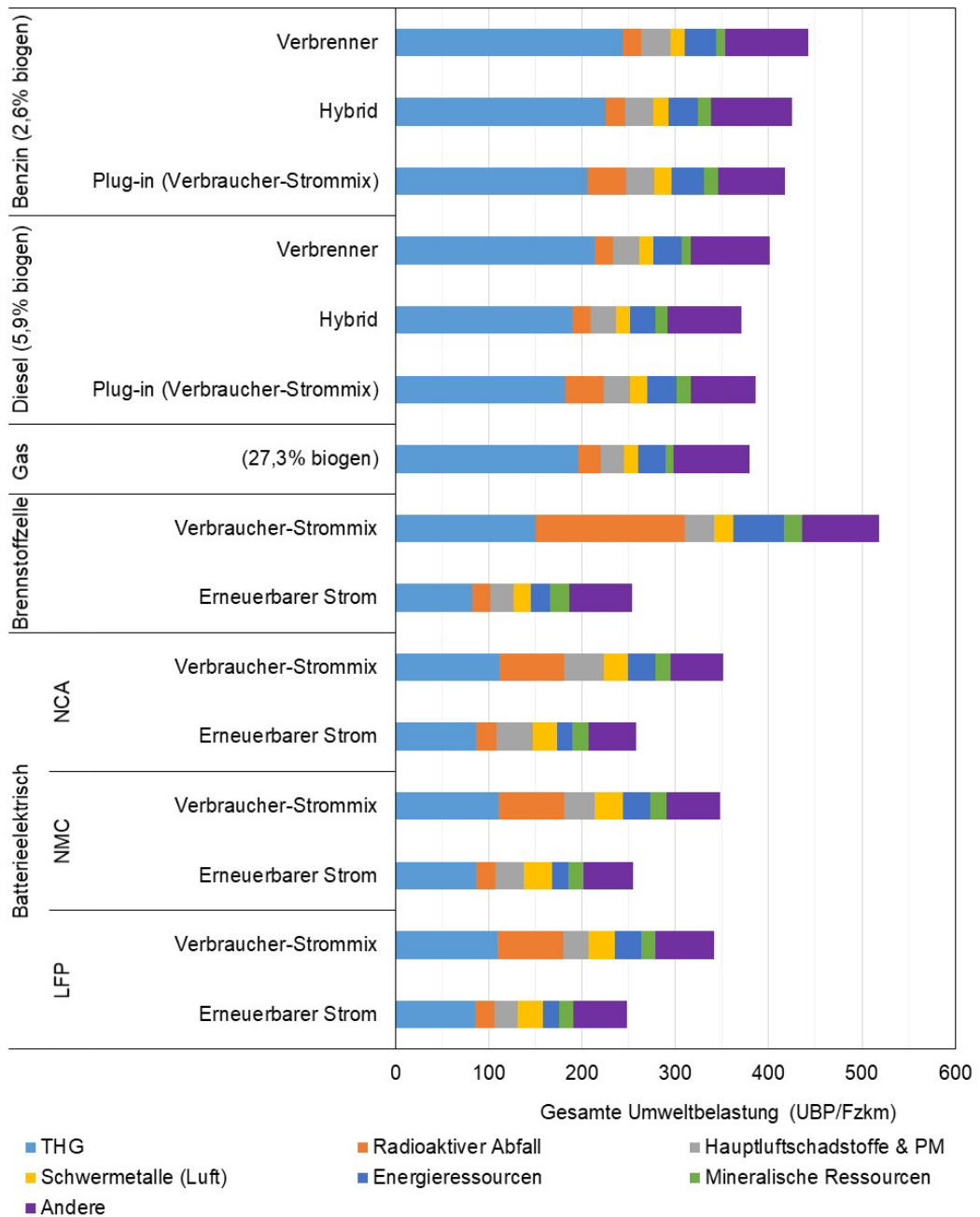


Abbildung 6: Einfluss der verschiedenen Antriebssysteme auf die gesamte Umweltbelastung, pro Fahrzeugkilometer eines Mittelklasse Personenwagens (1250-1750 kg, Beispielfahrzeuge siehe Tabelle 2) aufgeteilt auf die verschiedenen Wirkungskategorien.

Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %)

Erneuerbarer Strommix (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare).

Hinweis: Die Umweltbelastung bestimmter Fahrzeuge sowie ein individueller Strommix kann durch Eingabe der wichtigsten Parameter in der Excel-Tabelle unter [www.mobitool.ch](http://www.mobitool.ch) abgeschätzt werden.

NCA: Lithium-Ionen-Akkumulators mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid

NMC: Lithium-Ionen-Akkumulators mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid

LFP: Lithium-Ionen-Akkumulators mit einer Kathode aus Lithium-Eisenphosphat (LiFePO4)

Abbildung 6 zeigt, dass vor allem bei den Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (ICE: Benzin, Diesel, Gas) die THG-Emissionen den grössten Teil der Umweltbelastung verursachen. Der

Anteil der THG an der gesamten Umweltbelastung liegt bei den PHEV bei 48 %, bei den Hybriden bei 52 % und bei den reinen Verbrennern bei ungefähr 54 % und wird hauptsächlich durch die Herstellung und Nutzung des Treibstoffs (61 - 75 %) und die Herstellung des Fahrzeugs (16 - 26 %) verursacht. Bei Elektrofahrzeugen (BEV und FCEV) liegt der Anteil der THG an der gesamten Umweltbelastung bei knapp 32 % und entstammt vor allem der Herstellung des Fahrzeugs (knapp 54 %) gefolgt von der Bereitstellung des Strommix (25 %) bzw. dem Bau der Strasseninfrastruktur (21 %).

Wird für den Betrieb eines Elektrofahrzeuges der Verbraucher-Strommix verwendet, so haben die radioaktiven Abfälle einen bedeutsamen Anteil an der Umweltbelastung. Dies gilt insbesondere beim FCEV (29 %). In allen anderen Fällen beträgt der Anteil der radioaktiven Abfälle an der gesamten Umweltbelastung zwischen 8 % und 12 %. Die Hauptluftschadstoffe und die Emission von Schwermetallen in die Luft tragen zusammen zwischen 10 % und 19 % zur gesamten Umweltbelastung bei. Deren Anteil an der gesamten Umweltbelastung ist bei den elektrischen Fahrzeugen höher, dies ist vor allem auf die energieintensivere Herstellung des Antriebsstrangs und dabei entstehende Emissionen zurückzuführen, wohingegen beim Betrieb kaum Emissionen entstehen.

Der Verbrauch an Energieressourcen (z.B. Erdöl, Strom), ist bei den BEV im Vergleich zu Fahrzeugen mit ICE geringer, unabhängig davon, ob erneuerbarer Strom oder der Verbraucher-Strommix eingesetzt wird. Am höchsten ist der Verbrauch beim mit Verbraucher-Strommix betriebenen FCEV. Dies lässt sich auf die unterschiedliche Effizienz der Antriebsstränge und in der Bereitstellung der benötigten Antriebsenergie zurückführen.

### 3.2 **Nach wie vielen Fahrzeugkilometern ist ein alternativer Antrieb umweltfreundlicher als ein Benzinfahrzeug?**

Abbildung 7 zeigt die Umweltauswirkung von Fahrzeugen über den Verlauf ihrer Lebensfahrleistung. So lässt sich darstellen, nach wie vielen Kilometern die höhere Umweltbelastung in der Herstellung von BEV durch die tiefere Belastung während des Betriebs im Vergleich zu mit Benzin betriebenen Fahrzeugen ausgeglichen wird. Dargestellt werden UBP, THG-Emissionen und der kumulierte Energieaufwand (KEA), jeweils für das Mittelklasse BEV und FCEV mit dem Verbraucher-Strommix sowie erneuerbarem Strom. Als Referenz dient ein mit Benzin betriebener Mittelklasse-PW. Die Fahrleistung, ab der das jeweilige Fahrzeug eine geringere Umweltauswirkung verursacht als der mit Benzin betriebene Mittelklasse-PW, ist im Anhang in Tabelle 20 ausgewiesen.



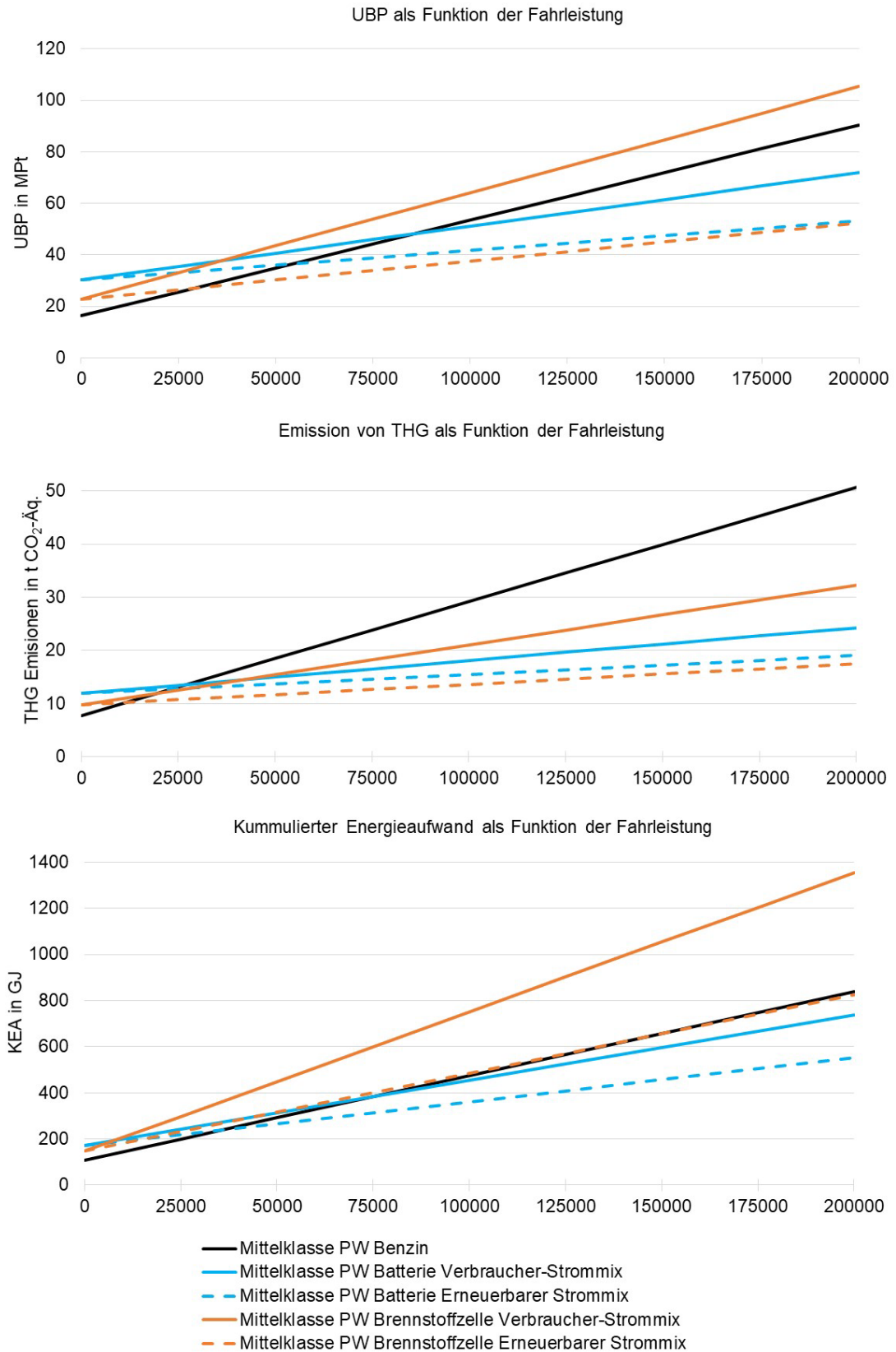


Abbildung 7: Treibhausgasemissionen (THG), gesamte Umweltbelastung (UBP) und kumulierter Energieaufwand (KEA) als Funktionen der Fahrleistung  
 Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %)  
 Erneuerbarer Strom (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare).

Bei den **Treibhausgasemissionen** (mittlere Grafik in Abbildung 7) zeigt sich, dass das BEV (hellblaue Linien) je nach Strom, der zum Laden verwendet wird, nach 23'000 bis 27'000 km der Fahrleistung niedrigere THG-Emissionen aufweist als das Benzinfahrzeug (schwarze Linie). Das FCEV (orange Linien) erreicht diesen Punkt je nach in der Wasserstoffproduktion eingesetztem Strom nach 11'000 bzw. 19'000 km Fahrleistung. Über eine Lebensfahrleistung von 200'000 km verursacht das modellierte Benzinfahrzeug knapp 51 t CO<sub>2</sub>-Äq. (Endpunkt schwarze Linie), das mit dem Verbraucher-Strommix betriebene BEV 24 t CO<sub>2</sub>-Äq. (Endpunkt hellblaue Linie) und das mittels Verbraucher-Strommix hergestelltem Wasserstoff betriebene FCEV 35 t CO<sub>2</sub>-Äq. (Endpunkt orange Linie). Wird der batterieelektrische Personenwagen mit erneuerbarem Strom betrieben, so betragen die Emissionen 19 t CO<sub>2</sub>-Äq. (Endpunkt hellblaue Strichlinie) und beim mittels erneuerbaren Stroms hergestelltem Wasserstoff betriebene FCEV 18 t CO<sub>2</sub>-Äq. (Endpunkt orange Strichlinie).

Für die über eine Fahrleistung von 200'000 km kumulierten Treibhausgasemissionen ist der verwendete Strom beim FCEV von grösserer Bedeutung als beim BEV. So liegt die Differenz zwischen dem BEV, angetrieben mit erneuerbarem Strom (mittlere Grafik, hellblaue Strichlinie) bzw. dem Verbraucher-Strommix (hellblaue Linie), bei etwa 5 t CO<sub>2</sub>-Äq. (+33 %). Ein mittels Verbraucher-Strommix hergestelltem Wasserstoff betriebenes FCEV (mittlere Grafik, orange Linie) verursacht hingegen 15 t CO<sub>2</sub>-Äq. (+74 %) mehr als ein FCEV, das Wasserstoff verwendet, welcher mit erneuerbarem Strom hergestellt wurde (mittlere Grafik, orange Strichlinie).

Bezüglich der **gesamten Umweltbelastung** (gemessen in UBP, oberste Grafik in Abbildung 7) zeigt sich, dass das BEV mit erneuerbarem Strom ab 54'000 km (hellblaue Strichlinie) und mit dem Verbraucher-Strommix ab 86'000 km Fahrleistung (hellblaue Linie) eine niedrigere Umweltbelastung aufweist als das Benzinfahrzeug (schwarze Linie). Das FCEV mit Wasserstoff, der mit dem Verbraucher-Strommix hergestellt wurde, liegt während der gesamten Lebensfahrleistung von 200'000 km deutlich über der gesamten Umweltbelastung des Referenz-Benzinfahrzeuges (schwarze Linie). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Verbraucher-Strommix bereits einen «Rucksack» von Umweltbelastungen, insbesondere aus der Kernenergie und den fossilen Anteilen, mitbringt und dieser durch den energieintensiven Prozess der Wasserstoffherstellung besonders ins Gewicht fällt. Wird erneuerbarer Strom zur Herstellung des Wasserstoffs verwendet, so weist das FCEV ab 30'000 km eine niedrigere Umweltbelastung auf als das Referenz-Benzinfahrzeug.

Die unterste Grafik in Abbildung 7 zeigt den Fahrzeugvergleich über die Fahrleistung bezüglich **kumulierten Energieaufwands**. Augenfällig ist der deutlich grössere Energieaufwand der FCEV, sowohl im Vergleich zu den BEV als auch im Vergleich zum Referenz-Benzinfahrzeug. Das BEV hat ab 36'000 km (erneuerbarer Strom) bzw. ab 77'000 km (Verbraucher-Strommix) einen niedrigeren kumulierten Energieaufwand als das Referenzfahrzeug. Das FCEV hat nach 147'000 km einen tieferen kumulierten Energieaufwand als das Benzinfahrzeug, sofern erneuerbarer Strom eingesetzt wird.

### 3.3 Einfluss der Fahrzeuggrösse

Bei den in Abbildung 8 gezeigten Fahrzeugen handelt es sich um Fahrzeuge gemäss der Kategorisierung in Tabelle 2 und Tabelle 3. Während für alle anderen Fahrzeuge dieselbe Lebensfahrleistung angenommen wurde, ist für das Mikro-Fahrzeug aufgrund dessen Einsatzprofils in den Inventardaten eine tiefere Lebensfahrleistung von 60'000 km hinterlegt. Dadurch fällt der Einfluss der Fahrzeugherstellung pro Kilometer höher aus. Die Umweltbelastung einer bestimmten Lebensfahrleistung kann durch Eingabe der wichtigsten Parameter im Excel-Tabelle unter [www.mobitool.ch](http://www.mobitool.ch) abgeschätzt werden.

Bei den BEV und den PHEV wird neben der Nennung des Segments auch die Batteriekapazität (in kWh) angegeben, weil für die Ökobilanz das Fahrzeuggewicht und insbesondere die Batteriegrösse entscheidend sind. Bei einer Einzelfahrzeugbetrachtung, muss beachtet werden, dass

z.B. ein BEV aus der Kategorie «Kompakt» mit einer für das Segment vergleichsweise grossen Batterie eher der Kategorie «Mittelklasse» entspricht. Das Umgekehrte trifft entsprechend für ein BEV der Oberklasse mit einer eher kleineren Batterie zu, das sodann eher einem Mittelklassefahrzeug entspricht.

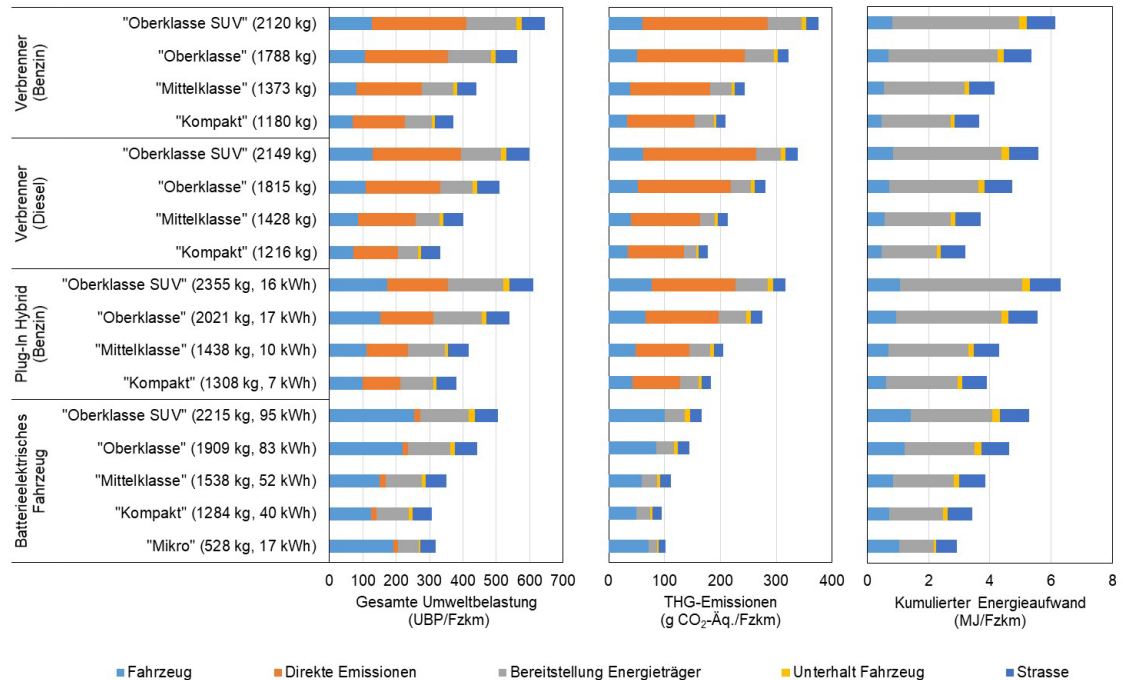


Abbildung 8: Einfluss der Fahrzeuggrösse und des Fahrzeuggewichts bei Personenwagen auf die gesamte Umweltbelastung, die Emission von Treibhausgasen und den kumulierten Energieaufwand (Beispielfahrzeuge siehe Tab. 2, Batteriechemie: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid (NCA).

Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %)

Wie zu erwarten, verursachen die kleineren Fahrzeuge eine geringere Umweltbelastung (linke Spalte in Abbildung 8), erzeugen weniger Treibhausgasemissionen (mittlere Spalte) und haben einen geringeren kumulierten Energieaufwand (rechte Spalte) als die grösseren Fahrzeuge mit demselben Antrieb. Während jedoch bei den BEV der Verbrauch (Bereitstellung Energieträger) hinsichtlich der gesamten Umweltbelastung und der THG-Emissionen eine geringere Rolle spielt, sondern eher die Grösse der Batterie und damit die Reichweite, wird die Auswirkung bei den ICE massgeblich durch den Verbrauch und damit insbesondere durch die direkten THG-Emissionen während der Fahrt bestimmt.

Auffällig ist, dass die THG-Emissionen (mittlere Spalte) sogar bei BEV mit grossen Batterien (Oberklasse SUV) tiefer sind als beim mit Benzin und dem Diesel betriebenen Kompaktfahrzeug. Wird die gesamte Umweltbelastung betrachtet (linke Spalte), schneiden die BEV verglichen mit den Benzin- und Dieselfahrzeugen derselben Fahrzeugklasse jeweils besser ab.

Die relativen Unterschiede zwischen den THG-Emissionen der Mittelklasse und der kleinsten bzw. der grössten Kategorie innerhalb derselben Antriebsart sind in Tabelle 9 aufgeführt. Die Fahrzeuge der Kompaktklasse verursachen zwischen 11 % und 17 % weniger THG-Emissionen pro km als die Mittelklasse PW derselben Antriebsart, wohingegen die Emissionen der Oberklasse SUV um 51-58 % höher liegen als die der Mittelklasse-PW.

Tabelle 9: THG-Emissionen der verschiedenen Grössenklassen in Relation zum jeweilige Mittelklasse-PW.

	Mikro	Kompakt	Mittelklasse	Oberklasse	Oberklasse SUV
Benzin		-14 %	0 %	+32 %	+54 %
Diesel		-17 %	0 %	+32 %	+58 %
Plug In- Benzin		-11 %	0 %	+34 %	+54 %
BEV	-8 %	-14 %	0 %	+30 %	+51 %

Den grössten Unterschied gibt es zwischen dem Oberklasse SUV (Benzin) und dem BEV-Kompaktfahrzeug, welches 75 % niedrigere THG-Emissionen aufweist. Bei den UBP liegt das Reduktionspotenzial bei 53 % und beim kumulierten Energieaufwand bei 44 % (siehe absolute Werte in Tabelle 15 - Tabelle 17).

### 3.4 Vergleich mit anderen Verkehrsmitteln

In der Hintergrunddatenbank (UVEK:2018), die für diesen Fachbericht verwendet wurde, stehen auch Inventare für andere Verkehrsmittel zur Verfügung, wodurch die Umweltbelastung der unterschiedlichen Personenwagen auch mit anderen Verkehrsmitteln verglichen werden kann. Beim Vergleich der Treibhausgasemissionen und der Umweltbelastung von Personenwagen mit anderen Verkehrsmitteln ist zu berücksichtigen, dass nicht alle Verkehrsmittel für jede Distanz gleich gut geeignet sind. In Abbildung 9 und Abbildung 10 wird deshalb die Umweltauswirkung der verschiedenen Verkehrsmittel nicht in Fahrzeug- oder Personenkilometer ausgedrückt, sondern pro Person für jeweils eine vordefinierte Strecke von 5 km, 30 km und 100 km unter Verwendung eines durchschnittlichen Belegungsgrades gemäss Inventar. Die verwendeten Werte für die Auslastung sind: Fernverkehr Bahn = 33 %, S-Bahn = 26 %, PW = 1.6 Personen, Zweiräder = 1 Person. Für die Bereitstellung der elektrischen Antriebsenergie wird bei den Velos, Scootern und Personenwagen der Verbraucher-Strommix CH verwendet. Der Vergleich verschiedener Verkehrsmittel kann ebenfalls unter [www.mobitool.ch](http://www.mobitool.ch) erfolgen. Dort können die wichtigsten Parameter, beispielsweise der Belegungsgrad, angepasst werden (siehe Excel-Tabelle unter [www.mobitool.ch](http://www.mobitool.ch)).

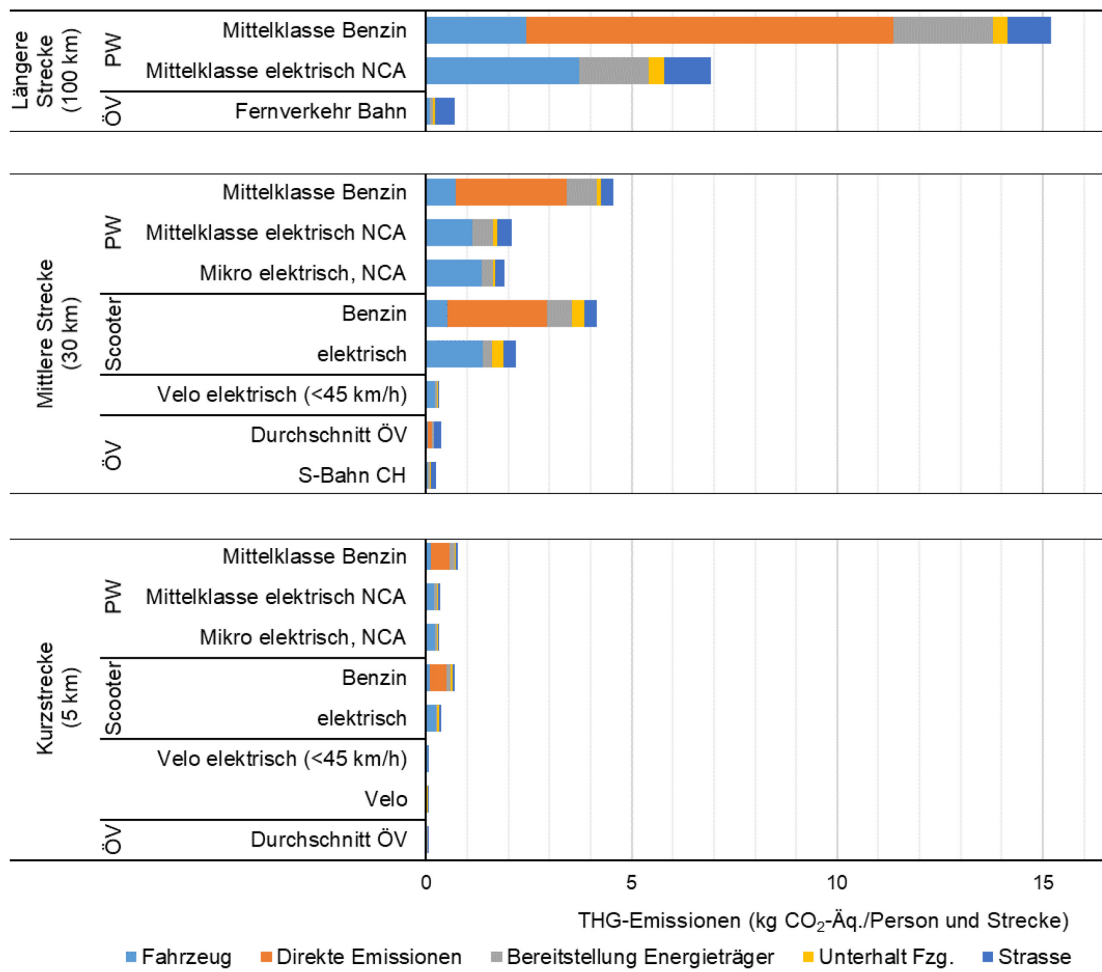


Abbildung 9: Treibhausgasemissionen pro Person für eine Strecke von 5 km, 30 km und 100 km bei durchschnittlichem Belegungsgrad. Angenommene Belegungsgrade: Fernverkehr Bahn = 33 %, S-Bahn = 26 %, PW = 1.6 Personen, Zweiräder = 1 Person (Daten siehe Tabelle 18).

NCA: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid

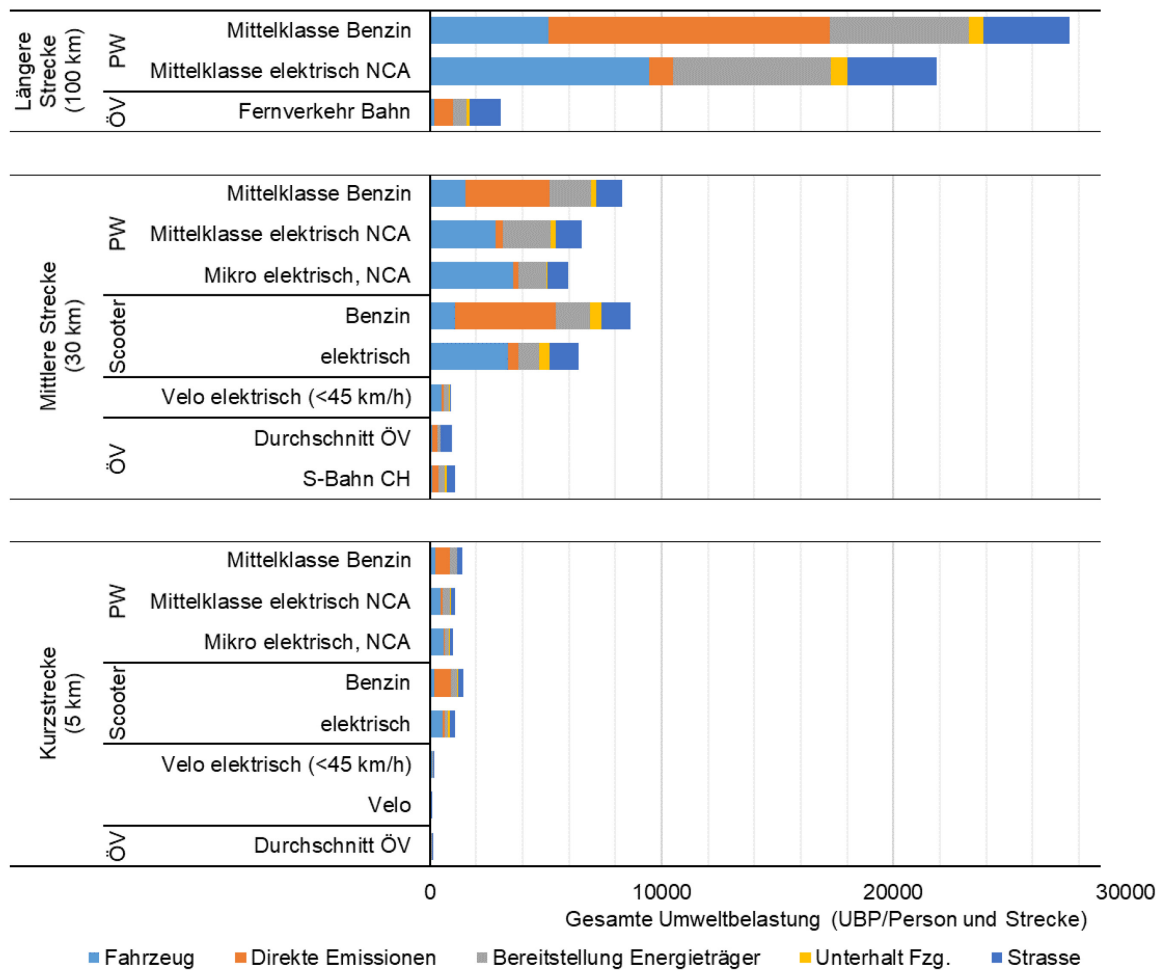


Abbildung 10: Umweltbelastungspunkte pro Person für eine Strecke von 5 km, 30 km und 100 km bei durchschnittlichem Belegungsgrad. Angenommene Belegungsgrade: Fernverkehr Bahn = 33 %, S-Bahn = 26 %, PW = 1.6 Personen, Zweiräder = 1 Person (Daten siehe Tabelle 19)

NCA: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid

Der Vergleich zeigt auf, dass auf allen betrachteten Distanzen jeweils der öffentliche Verkehr bzw. der Veloverkehr deutlich am wenigsten Treibhausgasemissionen und die geringste Umweltbelastung verursachen. Das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (ICE, hier Benzin) hingegen verursacht mit Abstand am meisten Emissionen bzw. die höchste Umweltbelastung. Bei einer Fahrt mit einem Benzin-Personenwagen über 100 km entstehen pro Person über den gesamten Lebenszyklus betrachtet Emissionen, die ungefähr 15 kg CO<sub>2</sub>-Äq. entsprechen. Dies ist etwa der 26-fache Wert einer Fahrt mit dem Fernverkehr der Bahn über 100 km. Selbst Kurzstreckenfahrten von 5 km mit einem PW verursachen THG-Emissionen, die vergleichbar oder sogar höher sind als diejenigen einer Bahnfahrt über eine Strecke von 100 km. Im Vergleich zu Benzin-PWs haben BEVs zwar niedrigere Treibhausgasemissionen, vergleicht man sie mit anderen Verkehrsmitteln (Veloverkehr und ÖV auf Kurz- und Mittelstrecke sowie ÖV auf längeren Distanzen), so verursachen sie jedoch ebenfalls deutlich höhere Emissionen. Selbst die Fahrt mit dem BEV verursacht pro Person auf 100 km ein Treibhausgaspotenzial von etwa 6.9 kg CO<sub>2</sub>-Äq. und liegt damit etwa 10-mal höher als die Emission bei Nutzung der Bahn.

Auch auf kurzen und mittleren Distanzen verursacht der ÖV deutlich niedrigere THG-Emissionen und eine geringere Umweltbelastung als die Fahrt mit dem Personenwagen. Auf diesen Distanzen sind Velos oder E-Bikes eine Alternative mit sehr geringen Umweltauswirkungen, die unterhalb des ÖVs liegen. Scooter hingegen haben, aufgrund des Materialeinsatzes und der geringen Lebensfahrleistung, pro Person und gefahrene Strecke eine Umweltauswirkung, die in einem ähnlichen Bereich liegt wie die des entsprechenden Personenwagens.



### 3.5 Entwicklungspotenziale

Die Ergebnisse der in Kapitel 2.4 beschriebenen zwei Hauptszenarien für die Klima- und Umweltauswirkung von Personenwagen sind in Abbildung 11 beziehungsweise Abbildung 12 dargestellt. In den Grafiken abgebildet sind Hybrid-Fahrzeuge (HEV), Plug-In Hybridfahrzeuge (PHEV), Fahrzeuge mit Brennstoffzelle (FCEV) sowie mit batterieelektrischem Antrieb (BEV). Nicht abgebildet sind zukünftige Fahrzeuge mit reinem Verbrennungsantrieb (ICE), da davon auszugehen ist, dass in 2030 die meisten Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor zumindest als HEV konzipiert sind. Um die Abbildungen einfacher zu halten, sind zukünftige Fahrzeuge mit Dieselmotor ebenfalls nicht abgebildet, da deren Einbezug keine zusätzliche Aussage ermöglichen würden. Als Referenz sind in den Grafiken die THG-Emissionen beziehungsweise die UBP der Fahrzeuge aus dem Jahr 2021 dargestellt (siehe Kapitel 3.1).

Bei Hybrid-Fahrzeugen (HEV, PHEV) wird angenommen, dass der Verbrennungsmotor für sämtliche Zeithorizonte ausschliesslich mit synthetisch hergestelltem Benzin betrieben wird. Dessen Herstellung erfolgt im umliegenden Ausland mit dem entsprechenden Strommix (Szenario WWB: Tabelle 30, Szenario ZERO-Basis: Tabelle 31, Anhang 7.3). Alternativ hätte auch eine prozentuale Beimischung von synthetischem Treibstoff zum fossilen gewählt werden können. Eine solche Annahme hätte die Grundaussage nicht geändert.

Der Wasserstoff für das Fahrzeug mit Brennstoffzellen-Antrieb (FCEV) wird im Szenario WWB in der Schweiz mit dem entsprechenden Strommix hergestellt. Im Szenario ZERO-Basis wird von einem höheren Gesamtbedarf an Wasserstoff in der Schweiz ausgegangen, wodurch zunehmend in der EU hergestellte Energieträger eingesetzt werden (Importanteile H<sub>2</sub> 2040 = 26 %, 2050 = 57 %; Importanteil synthetische Treibstoffe; 2030 - 2050 = 100 %). Die Sensitivität des Strommix in der Herstellung synthetischer Treibstoffe wird in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt.

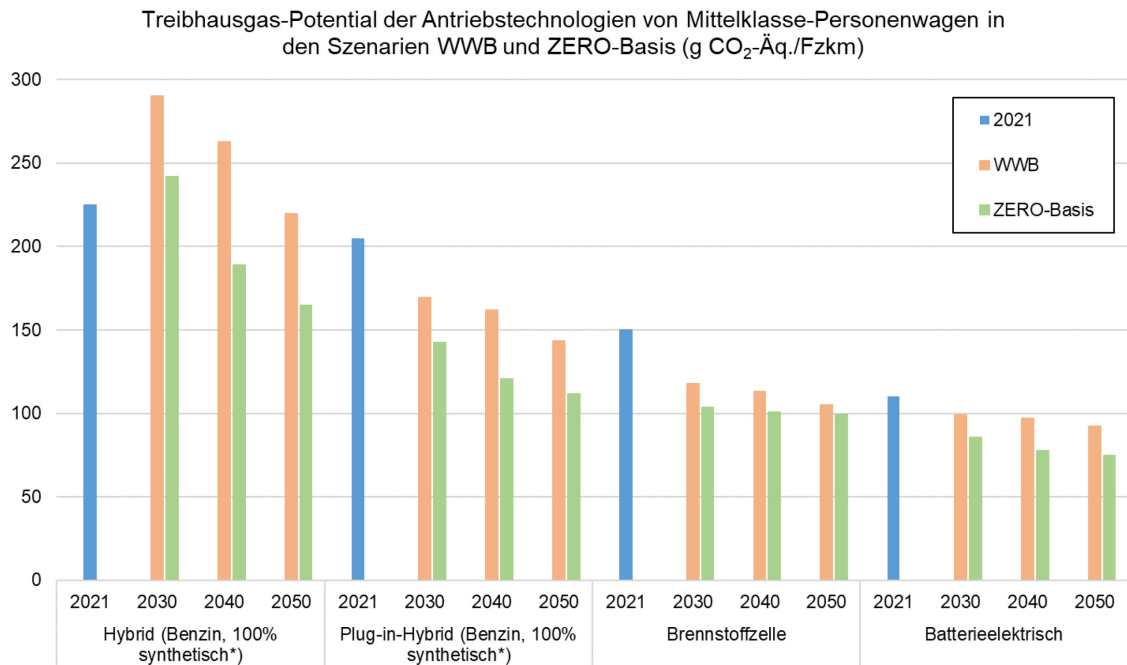


Abbildung 11: THG-Potenzial eines Mittelklassefahrzeugs mit verschiedenen Antriebstechnologien in den Szenarien «Weiter Wie Bisher» (WWB) und «Netto Null» in der Basisvariante (ZERO-Basis) in g CO<sub>2</sub>-Äquivalenten.

\* ab 2030, Herstellung im umliegenden Ausland mit dem jeweiligen Strommix (S. Anhang 7.3)

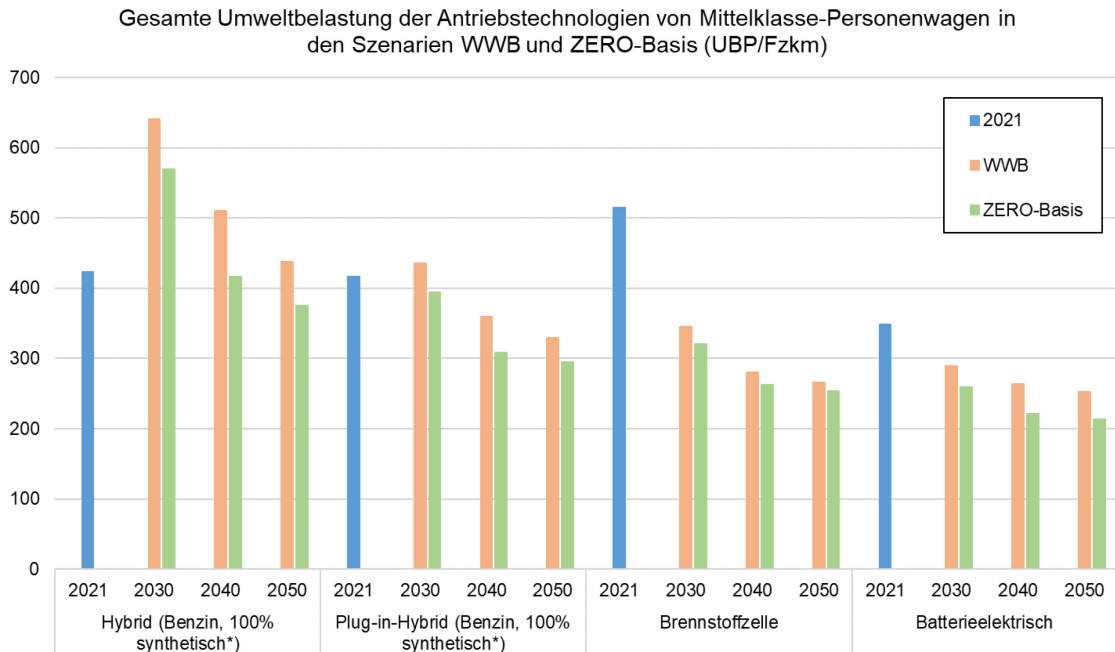


Abbildung 12: Gesamte Umweltbelastung eines Mittelklassefahrzeugs mit verschiedenen Antriebstechnologien in den «Weiter Wie Bisher» (WWB) und «Netto Null» in der Basisvariante (ZERO-Basis) in Umweltbelastungspunkten (UBP).

\* ab 2030, Herstellung im umliegenden Ausland mit dem jeweiligen Strommix (S. Anhang 7.3)

Die Treibhausgasemissionen des Hybridfahrzeugs (HEV) unterschreiten im Szenario WWB bis 2050 diejenigen des HEV von 2021 nur knapp, die gesamte Umweltbelastung des HEV wird gemäss WWB bis 2050 höher als 2021 liegen. Dies ist auf den in den Prognosen für 2050 immer noch vorhandenen fossilen Anteil in der Stromerzeugung zur Herstellung des synthetischen Treibstoffs zurückzuführen (S. Tabelle 30 und Tabelle 31). Im Szenario ZERO-Basis erreichen HEV eine THG-Reduktion von - 27 % und eine Reduktion der gesamten Umweltbelastung von - 11 %.

Das Plug-In-Hybridfahrzeug (PHEV) erreicht im ZERO-Basis-Szenario bis 2050 bei den THG-Emissionen eine Reduktion von 46 % und weist damit etwa gleichviel THG-Emissionen aus wie das BEV 2021. Die gesamte Umweltbelastung des PHEV erreicht im Szenario ZERO-Basis 2050 ein Reduktionspotenzial von minus 29 %. Unter den getroffenen Annahmen können HEV und PHEV bezüglich Emissionen von Treibhausgasen selbst im Jahr 2050 die Werte des batterieelektrischen Fahrzeuges von 2021 nicht unterschreiten (Abbildung 11). Für HEV gilt dies auch bei der gesamten Umweltbelastung, PHEV hingegen können ab 2040 das Niveau des aktuellen (2021) BEV erreichen (Abbildung 12).

Das Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) hat bis 2050 (ZERO-Basis) ein Einsparpotenzial von - 34 % THG-Emissionen und - 51 % der gesamten Umweltbelastung. Allerdings sind THG-Emissionen und die gesamte Umweltbelastung jeweils höher als beim BEV 2050.

Beim batterieelektrischen Fahrzeug reduziert sich im Vergleich zum BEV 2021 die gesamte Umweltbelastung um bis zu 39 % und die Emission von Treibhausgasen bis zu 32 % (ZERO-Basis 2050).

Die insgesamt tiefste gesamte Umweltbelastung und THG-Emissionen im Szenario ZERO-Basis für 2050 verursacht das BEV. Das FCEV liegt 19 % (UBP) bzw. 33 % (THG) darüber, das PHEV 38 % (UBP) bzw. 49 % (THG) und beim HEV sind die Werte 76 % (UBP) und 121 % (THG) höher als beim BEV.



### Einfluss des für die Bereitstellung der Antriebsenergie verwendeten Stromes

Die dargestellten Szenarien WWB und ZERO-Basis weisen insbesondere für die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor grosse Unterschiede auf. Um den Einfluss des für die Erzeugung der Antriebsenergie verwendeten Strommix klarer zu machen, wird in Abbildung 13 und Abbildung 14 neben den beiden modellierten Szenarien auch die Verwendung von reinem Windstrom dargestellt. Dabei wird neben einem ICE mit synthetischem Benzin auch ein ICE mit synthetischem Diesel betrachtet. Alle dargestellten Fahrzeuge wurden dabei mit einer Lebensfahrleistung von 300'000 km modelliert.

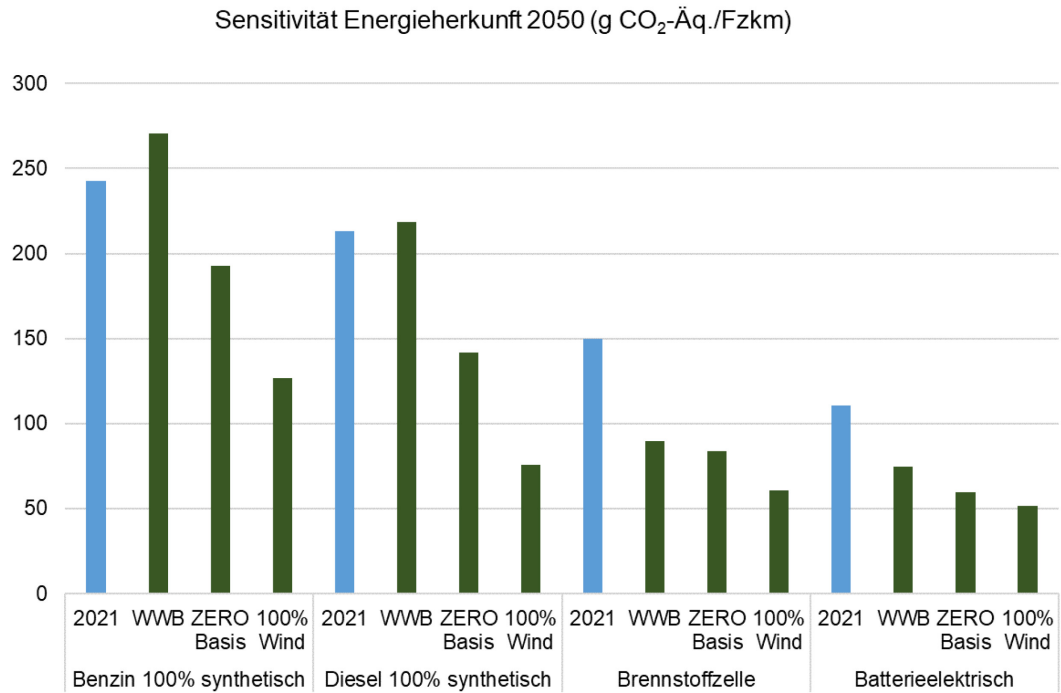


Abbildung 13: Sensitivität der Energieherkunft auf das THG-Potenzial verschiedener Antriebstechnologien

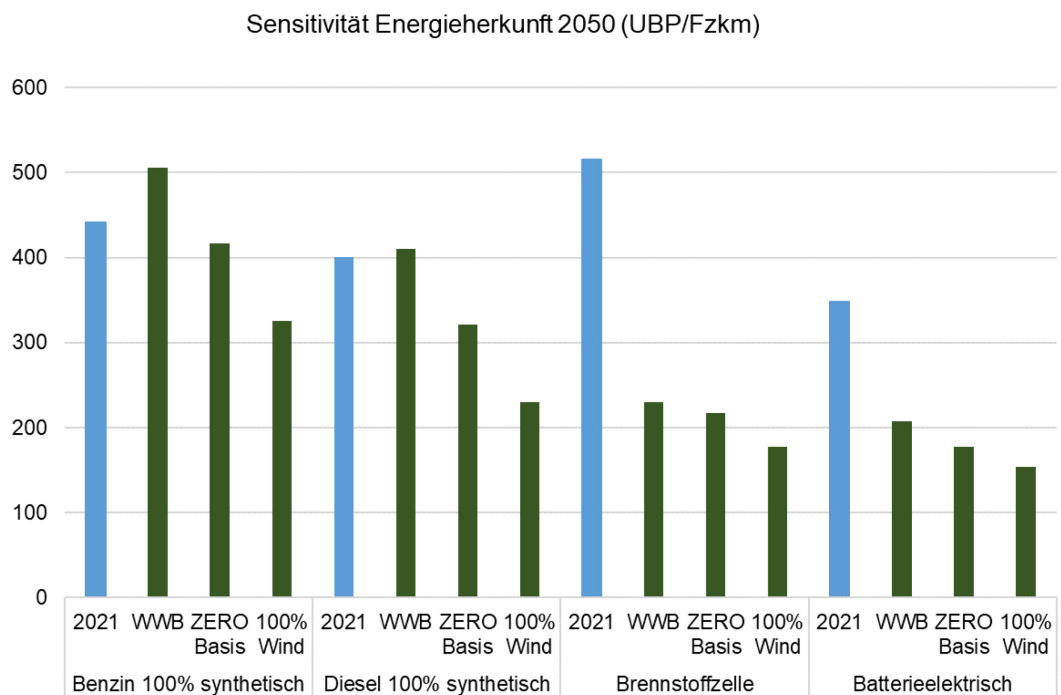


Abbildung 14: Sensitivität der Energieherkunft auf die Umweltbelastung in UBP verschiedener Antriebstechnologien

Die Unterschiede zwischen synthetischem Benzin (Methanol Synthese) und synthetischem Diesel (Fischer-Tropsch-Verfahren) sind überwiegend darauf zurückzuführen, dass es sich bei der Herstellung um Prozesse mit mehreren Produkten handelt und in den beiden Verfahren verschiedene Kohlenwasserstoffe in unterschiedlichen Anteilen und einem unterschiedlichen finanziellen Erlös generiert werden. In diesen Prozessen lassen sich die Infrastruktur, der nötige Energieaufwand und die Emissionen sich nicht direkt einem einzelnen Produkt zuordnen. Deshalb muss in den Inventaren eine Allokation durchgeführt werden. Diese erfolgt ökonomisch, und somit kommen für synthetisches Benzin und synthetischen Diesel jeweils andere Allokationsfaktoren zum Einsatz (S. Tabellen in Anhang 7.4). Allerdings hat auch die leicht höhere Effizienz des Dieselmotors aufgrund des hohen Bedarfs an Primärenergie für die Herstellung synthetischer Treibstoffe einen Einfluss auf das Resultat. Zurzeit lässt sich nur sehr schwer abschätzen, wie der zukünftige Produktionsprozess für synthetische Treibstoffe aussehen wird. Dies betrifft die erzeugten Produkte und den finanziellen Erlös. Die Darstellung der beiden, mit unterschiedlichen Verfahren hergestellten, synthetischen Treibstoffen erlaubt einen ansatzweisen Einblick der Auswirkung der Allokation auf das Ergebnis pro Fahrzeugkilometer. Obwohl im Szenario ZERO-Basis das synthetische Benzin weitgehend (97 %) mit erneuerbarem Strom hergestellt wird, ist das THG-Potenzial des mit synthetischem Benzin betriebenen Fahrzeugs nur 20 % unter dem Benzin-Fahrzeug von 2021. Nur wenn bei der Herstellung ausschliesslich Windenergie oder ein Strom mit ähnlich tiefem Treibhausgaspotenzial eingesetzt wird, kann mit synthetisch hergestelltem Benzin oder Diesel eine deutliche Reduktion der Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 2021 von 48 % (Benzin) bzw. 64 % (Diesel) erzielt werden.

Bei der Treibstoffherstellung mit 100 % Windenergie liegen die THG-Emissionen des ICE mit synthetischem Diesel um 47 % und beim ICE mit synthetischem Benzin um das 2.4-fache über dem mit 100 % Windenergie geladenen BEV. Sowohl FCEV als auch BEV haben in allen betrachteten Szenarien in 2050 deutlich tiefere THG-Emissionen als ein Benzinfahrzeug mit synthetischem Treibstoff, der mit 100 % Windkraft hergestellt wurde.

Die gesamte Umweltbelastung (in UBP) folgt weitestgehend dem für die THG beschriebenen Muster. Allerdings resultiert in den Szenarien WWB und ZERO-Basis durch den Einsatz von synthetischen Treibstoffen keine bzw. eine geringe Reduktion der gesamten Umweltbelastung im Vergleich zum BEV 2021. Wenn 100 % Windkraft zur Herstellung der synthetischen Treibstoffe eingesetzt wird, liegt deren Umweltbelastung bis zu 34% (Dieselfahrzeug) unter dem Niveau des BEV 2021. Die UBP-Reduktion beim FCEV 2050 im Vergleich zum FCEV 2021 liegt zwischen 55 und 66 % (WWB – 100 % Windkraft) und diejenige beim BEV zwischen 40 - 56 % im Vergleich zum BEV 2021.

## 4 Einordnung der Resultate und zusätzliche Sensitivitätsanalysen

### 4.1 Vergleich mit anderen Ökobilanzen von Personenwagen

In den meisten Studien zu Fahrzeugen mit unterschiedlichen Antriebssystemen werden diese hinsichtlich ihrer Treibhausgasemissionen verglichen. In diesem Kapitel werden deshalb primär die Auswirkungen auf das Klima, ausgedrückt in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, betrachtet. Im Folgenden werden die wichtigsten Resultate von ausgewählten Studien und deren Unterschiede im Vergleich zum vorliegenden Bericht beschrieben. Neben früheren Publikationen aus der Schweiz (treeze (2018), PSI (2020)) werden drei weitere aktuelle Studien berücksichtigt (ICCT (2022), Wietschel et. al. (2022); IPCC (2022)). Die relativen Reduktionspotenziale der betrachteten alternativen Antriebe sind in Tabelle 10 aufgeführt.

**«Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien»** (Wietschel, Link, Biemann, & Helms, 2022). Die Studie wurde vom Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI sowie dem Ifeu-Institut für Energie und Umwelttechnik Heidelberg GmbH im Auftrag der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) erstellt. Inhaltlich fokussiert die Studie neben der Umweltbelastung auch auf die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Antriebssysteme heute und in Zukunft. Die Studie betrachtet auch mit synthetischem Benzin sowie Biogas betriebene ICE. Die Umweltbelastung wird als die Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen, Emissionen von Luftschadstoffen und den Verbrauch von kritischen Rohstoffen beschrieben. Eine Aggregation der verschiedenen Umweltauswirkungen, wie im vorliegenden Bericht mittels UBP, steht nicht zur Verfügung. Das grösste Potenzial zur Reduktion der THG-Emissionen weisen gemäss der Studie insbesondere kurzfristig (bis 2030) BEV aus. PHEV hingegen verursachen nur dann weniger Emissionen, wenn sie einen hohen elektrischen Fahranteil erreichen. Mit Biogas betriebene ICE Fahrzeugen können gemäss der Studie ähnlich tiefe THG-Emissionen erreichen wie ein BEV, jedoch wird der Einsatz von Biogas aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit von der Autorin und den Autoren insbesondere längerfristig als kritisch betrachtet. Mit zu 100 % erneuerbarer Energie hergestellten strombasierten Treibstoffen (H<sub>2</sub>, synthetisches Benzin) können ebenso tiefe THG-Emissionen erzielt werden wie mit einem mit erneuerbarem Strom betriebenen BEV. Werden die Treibstoffe jedoch mit dem Deutschen Strommix (2019) hergestellt, sind die Emissionen bei FCEV etwa gleich und beim synthetischen Benzin um über 60 % höher als das mit fossilem Benzin betriebene ICE. Die Studie bewertet die betrachteten synthetischen Treibstoffe deshalb als kurzfristig nicht geeignet zur Reduktion der THG-Emissionen von Personenwagen. Unterschiede und Ähnlichkeiten zum vorliegenden Bericht: Gemäss der Studie ist die potenzielle THG-Reduktion durch zukünftige, zu 100 % erneuerbar hergestellte synthetische Treibstoffe etwas grösser als im vorliegenden Fachbericht des BAFU. Andererseits weist die Studie für synthetische Treibstoffe, welche mit dem Strommix hergestellt werden, deutliche höhere Mehremissionen im Vergleich zum mit fossilem Benzin betriebenen ICE aus. In beiden Publikationen weisen BEV die tiefste Sensitivität für die Energieherkunft auf. Ebenfalls vergleichbar ist die angenommene Lebensfahrleistung der Fahrzeuge (187'500 km) sowie der Einfluss des elektrischen Fahranteils bei PHEV. In beiden Fällen erzielen PHEV nur dann eine Reduktion der THG-Emissionen, wenn ein häufiges Aufladen der Fahrzeuge angenommen wird.

**«More bang for the buck: A comparison of the life-cycle greenhouse gas emission benefits and incentives of plug-in hybrid and battery electric vehicles in Germany»** (ICCT, 2022). Die Studie im Auftrag des International Council on Clean Transportation (ICCT) untersucht die Effizienz der Subventionen für PHEV und BEV in Deutschland. Im ersten Teil der Studie werden dazu die THG-Emissionen ausgewählter PHEV und BEV ermittelt und mit denjenigen von ICE (Benzin und Diesel) verglichen. Im zweiten Teil wird die Effizienz von Subventionen im Verhältnis zur erzielten Reduktion von THG-Emissionen ermittelt, worauf hier nicht weiter eingegangen wird. Die Studie weist für BEV gegenüber ICE (Benzin) eine Reduktion der THG-Emissionen von durchschnittlich 63 % aus. Bei PHEV liegt sie bei durchschnittlich 34 %, wobei die THG-Emissionen stark vom elektrischen Fahranteil abhängig sind. Für die einzelnen PHEV

werden Reduktionen im Vergleich zu ICE (Benzin) von 10 % bis 52 % angegeben. Für zukünftige Fahrzeuge (2030) prognostiziert die Studie gegenüber ICE (Benzin) eine Reduktion der THG-Emissionen von 74 % bis 80 % für BEV sowie 40 % bis 63 % für PHEV. Unterschiede und Ähnlichkeiten zum vorliegenden Bericht: Der hinsichtlich der Resultate grösste Unterschied zum vorliegenden Bericht ist die von ICCT bei allen Fahrzeugen höher angenommene Lebensfahrleistung (240'000 km). Bei BEV werden von ICCT für die Herstellung der Batterie etwas tiefere THG-Emissionen angenommen, jedoch verwendet die Studie für den Betrieb den Strommix von Deutschland 2020, welcher CO<sub>2</sub>-intensiver ist als der hier im vorliegenden Bericht verwendete Verbraucher-Strommix der Schweiz 2018. Diese gegenläufigen Annahmen gleichen sich weitgehend aus. Würde für beide Untersuchungen dieselbe Lebensfahrleistung eingesetzt, ergäben sich praktisch dieselben absoluten Resultate.

«**IPCC Sixth Assessment Report. Chapter 10: Transport**» (IPCC, 2022). Der sechste Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) bewertet die Fortschritte bei der Begrenzung von Emissionen und das Spektrum an verfügbaren Minderungsoptionen in Energiesystemen und Städten sowie in Sektoren wie Land- und Forstwirtschaft, Landnutzung, Gebäude, Verkehr und Industrie. Für den Bereich Verkehr enthält der Bericht eine Übersicht über die gesamten THG-Emissionen verschiedener Antriebstechnologien über den Lebenszyklus. Die angenommene Lebensfahrleistung ist 180'000 km. Gemäss dem Bericht bieten mit erneuerbarem Strom betriebene BEV das grösste THG-Reduktionspotenzial (- 61 %). Unterschiede und Ähnlichkeiten zum vorliegenden Bericht: Der auffälligste Unterschied ist, dass gemäss IPCC-Bericht mit Diesel betriebene ICE höhere THG-Emissionen verursachen als mit Benzin. Für die Strombasierten Antriebe (BEV, FCEV) steht im IPCC-Bericht kein vergleichbarer Strommix zur Verfügung. Die THG-Emissionen von mit erneuerbarem Strom betriebenen BEV und FCEV gemäss IPCC sind hingegen fast identisch mit den im vorliegenden Fachbericht präsentierten Ergebnissen.

«**Aktualisierung Umweltaspekte von Elektroautos**» (treeze, 2018). Die im Auftrag des BAFU 2012 erstellte Studie wurde 2018 aktualisiert. In der Studie wird neben den Auswirkungen auf die THG-Emissionen auch die aggregierte Umweltbelastung in UBP ermittelt. Allerdings sind die UBP in der Zwischenzeit ebenfalls aktualisiert worden, weshalb die Werte nicht direkt mit den in diesem Bericht präsentierten Zahlen verglichen werden können. Auch die Studie von treeze ermittelt für BEV tiefere THG-Emissionen als bei den anderen Antriebsarten. Die aggregierte Umweltbelastung in UBP des BEV ist aber höher angegeben als diejenige des Flottendurchschnittes der Benzinfahrzeuge, des klassenbesten Fahrzeugs mit Dieselmotor sowie auch höher als diejenige der Hybridfahrzeuge. Unterschiede und Ähnlichkeiten zum vorliegenden Bericht: Die Studie von treeze unterscheidet sich insbesondere bei zwei Annahmen vom vorliegenden Bericht. Einerseits wird in der Studie angenommen, dass bei jedem zweiten BEV während der Lebensdauer die Batterie ersetzt werden muss, es wird also mit durchschnittlich 1.5 Batterien pro BEV gerechnet. Andererseits basiert die Studie auf älteren Inventaren, in welchen insbesondere die Batterieherstellung mit einem höheren Energieaufwand modelliert ist. Da für die Herstellung der Batterien zudem ein Strommix mit einem hohen Anteil von Kohlestrom verwendet wird, fällt die gesamte Umweltbelastung von BEV vergleichsweise hoch aus.

«**Umweltauswirkungen von Personenwagen - Heute und Morgen**» (PSI, 2020). Das Faktenblatt des PSI wurde im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE) erstellt und basiert auf den auf <https://calculator.psi.ch> verfügbaren Daten des PSI. Das Faktenblatt vergleicht die THG-Emissionen sowie ausgewählte weitere Umweltindikatoren verschiedener Fahrzeuge über ihre Lebensdauer. Eine Aggregation der verschiedenen Umweltauswirkungen, wie im vorliegenden Bericht mittels UBP, steht nicht zur Verfügung. Neben der Betrachtung der verschiedenen Antriebstechnologien im Jahr 2018 wird auch eine Prognose für 2040 gemacht. Gemäss dem Faktenblatt verfügen BEV über das grösste Potenzial zur Reduktion der THG-Emissionen. FCEV verfügen ebenfalls über ein (geringeres) Reduktionspotenzial, jedoch nur, wenn erneuerbare Energie zur Herstellung des H<sub>2</sub> eingesetzt wird. Für 2040 wird bei allen Antriebsarten eine gewisse Verbesserung im Vergleich zu 2018 erwartet. Unterschiede und Ähnlichkeiten zum

vorliegenden Bericht: Im Faktenblatt wird von derselben Lebensfahrleistung ausgegangen (200'000 km). Das BEV verfügt über eine kleinere Batterie (36 kWh). Trotzdem kommen beide Publikationen zum Schluss, dass die höhere Umweltbelastung bei der Produktion von BEV durch die tieferen THG-Emissionen im Betrieb nach etwa 30'000 km kompensiert wird. Grund dafür sind die nun für diesen Fachbericht aktualisierten Inventardaten.

Der Vergleich konkreter Zahlen aus anderen Studien mit den vorliegenden Daten ist nicht sinnvoll, da die zugrundeliegenden Annahmen sich teilweise unterscheiden. Trotzdem gleichen sich die Tendenzen und Schlussfolgerungen der neueren Studien (ICCT, 2022), (Wietschel, Link, Biemann, & Helms, 2022) mit denjenigen im vorliegenden Bericht. So ist etwa die «Reihenfolge» der Antriebsarten bezüglich ihrer Umweltwirkung in den Studien weitgehend identisch. Im Vergleich zur ältesten hier berücksichtigten Studie (treeze, 2018) haben sich die Annahmen namentlich bezüglich der Batterieherstellung und der Lebensdauer der Batterie deutlich verändert.

Tabelle 10: THG-Reduktionspotenziale (Gegenwart) im Vergleich zum jeweiligen Referenzfahrzeug (Benzin) in ausgewählten Studien (n.V.: nicht Verfügbar)

Antrieb	Fachbericht BAFU 2023	(Wietschel, Link, Biemann, & Helms, 2022)	(ICCT, 2022) <sup>11</sup>	IPPC	(PSI, 2020)	(treeze, 2018)
ICE Benzin	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
ICE Diesel	-12 %	-9 %	-7 %	+13 %	-20 %	-5 %
HEV Benzin	-76 %	n.V.	-20 %	-9 %	n.V.	-16 %
PHEV Benzin	-33 %	-23 %	-34 %	n.V.	n.V.	-31 %
FCEV, Strommix (Erneuerbarer Strom)	-38 % (-66 %)	+2 % (-52 %)	-23 % (-78 %)	-2 % <sup>12</sup> (-56 %)	-36 % (-43 %)	n.V.
BEV, Strommix (Erneuerbarer Strom)	-55 % (-65 %)	-46 % (-66 %)	-63 % (-80 %)	-18 % <sup>13</sup> (-61 %)	-58 % (-62 %)	-44 % (-55 %)

#### 4.2 Betrachtung spezifischer Aspekte bei aktuellen Fahrzeugen

Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits beschrieben, beinhalten die erstellten Inventare und betrachteten Systeme eine Vielzahl von Annahmen (z.B. zum verwendeten Strom). Diese Annahmen können einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse aller oder einzelner Fahrzeuge haben. Im folgenden Kapitel sind daher einige wichtige Aspekte / Annahmen näher ausgeführt. Dies sind:

- Produktionstechnologie des Stromes
- Elektrischer Fahranteil an der gesamten Fahrleistung

Abschliessend bleibt zu erwähnen, dass auch die in diesem Kapitel aufgeführten Ergebnisse für ein bestimmtes Einsatzprofil gelten. So reduziert z.B. eine höhere Lebensfahrleistung die Umweltwirkung von BEV pro Fzkm, solange kein Batteriewechsel nötig ist. Somit steigt ihr Vorteil im Vergleich zu Personenwagen mit Verbrennungsmotoren an. Da Personenwagen über sehr unterschiedliche Einsatzprofile verfügen können, sollten bei der Beurteilung von Ökobilanzen im-

<sup>11</sup> Die Daten für FCEV & HEV entstammen einer früheren Studie des ICCT (Bieker, 2021).

<sup>12</sup> Bedingt vergleichbar, da Wasserstoff aus Erdgas-Dampfreformation (SMR) anstelle von Strommix

<sup>13</sup> Bedingt vergleichbar, da Ladestrom aus Erdgaskraftwerk anstelle von Strommix

mer die zugrundeliegenden Annahmen berücksichtigt werden. Für die Beurteilung eines konkreten Einzelfalls kann mittels der unter [www.mobitool.ch](http://www.mobitool.ch) verfügbaren Excel-Tabelle das jeweilige Einsatzprofil berücksichtigt werden.

#### 4.2.1 Einfluss der Produktionstechnologie des verwendeten Stromes für die Bereitstellung der Antriebsenergie

In diesem Kapitel wird der Einfluss des eingesetzten Stromes zur Bereitstellung der elektrischen Antriebsenergie dargestellt, d.h. es wird die Herkunft des Stroms zum Aufladen von BEV und für die Wasserstoffherstellung für FCEV betrachtet. Dargestellt sind Mittelklassefahrzeuge des Jahres 2021. Da zum heutigen Zeitpunkt keine grösseren Mengen an strombasierten synthetischen Treibstoffen auf dem Markt verfügbar sind, wurde auf eine Darstellung des Benzinfahrzeugs mit synthetischem Treibstoff verzichtet. Für mit diesen Treibstoffen betriebene ICE wäre die Umweltwirkung pro Fahrzeugkilometer jedoch, unabhängig vom verwendeten Strom, in keinem Fall geringer als die eines FCEV, da die Erzeugung der flüssigen Treibstoffe weitere Verluste bedingt und der Verbrennungsmotor die Energie weniger effizient umsetzt. Abbildung 15 stellt die gesamte Umweltbelastung (aufgeteilt nach Wirkungskategorie), das Treibhausgaspotenzial und den kumulierten Energieaufwand (aufgeteilt nach Energiequellen) dar.

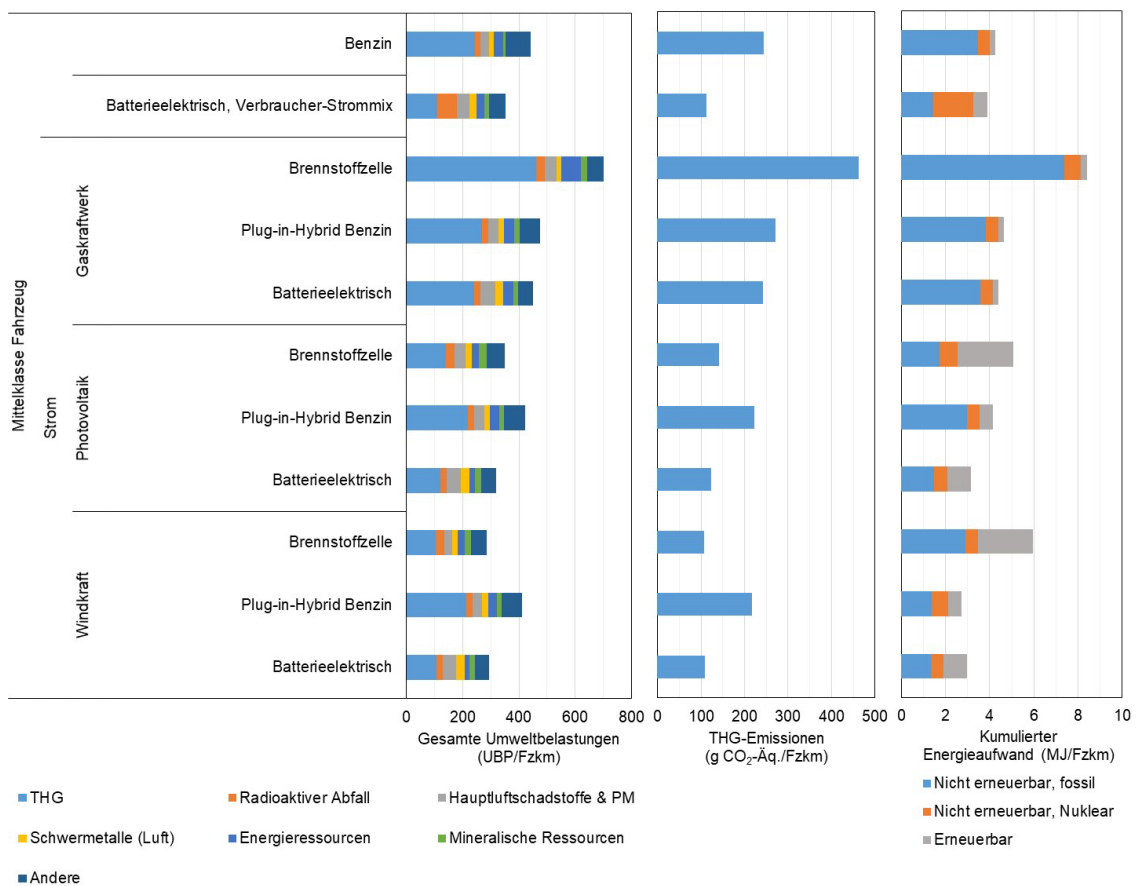


Abbildung 15: Einfluss der Stromherkunft auf die gesamte Umweltbelastung (aufgelöst nach Arten der Umweltwirkung), auf die Treibhausgasemissionen und auf den kumulierten Energieaufwand. Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %)

Bei allen dargestellten Fahrzeugen spielen die Treibhausgase bei der gesamten Umweltbelastung eine grosse Rolle. Je geringer die THG-Emissionen aus der Bereitstellung der Antriebsenergie, desto höher ist der Anteil der anderen Emissionen und Ressourcenverbräuchen an der gesamten Umweltbelastung. Hier vor allem Emissionen in die Luft aus der Vorkette und die Nutzung von Primärressourcen. Für alle drei gezeigten Indikatoren (gesamte Umweltbelastung, THG, kumulierter Energieaufwand) ähnelt sich das Bild. Mit einer Ausnahme: die FCEV schlagen beim KEA auch dann nach oben aus, wenn erneuerbare Energieträger eingesetzt werden. Dies aufgrund des Energieverlustes in der H<sub>2</sub>-Herstellung.

Bei der Verwendung von Strom aus (fossil-thermischen) Gaskraftwerken verursachen BEV und Plug-In-Hybride etwa gleichviele THG-Emissionen und UBP wie mit Benzin betriebene Fahrzeuge. Batterieelektrische Fahrzeuge liegen dabei sowohl bei den THG-Emissionen wie auch bei den UBP leicht unter dem Benzinfahrzeug und Plug-In-Hybride leicht darüber. Bei dem FCEV würde der Einsatz von Strom aus einem Gaskraftwerk zu deutlich höheren THG-Emissionen bzw. einer deutlich höheren Umweltbelastung gegenüber einem ICE führen. Der Einsatz von rein erneuerbarem Strom, der mittels heute installierter Photovoltaik oder Windkraft erzeugt wird, führt beim BEV zu einer Reduktion der Umweltbelastung von 9 bis 16 % gegenüber dem mit dem Verbraucherstrommix betriebenen Fahrzeug. Gegenüber dem Benzinfahrzeug liegt die Reduktion des Treibhausgaspotenzials bei 50 bis 56 % und die Reduktion der gesamten Umweltbelastung liegt bei 28 bis 33 %. Wird erneuerbarer Strom zur Herstellung des Wasserstoffs verwendet, so wäre die gesamte Umweltbelastung der FCEV 3 % tiefer (Windkraft) bzw. 10 % (Photovoltaik) höher als diejenige des vergleichbaren BEV. Die THG-Emissionen der FCEV läge um 3 % unter bzw. 16 % über denen des vergleichbaren BEV.

Der Einfluss der Stromherkunft hängt sehr stark vom Gesamtwirkungsgrad des Antriebs ab. Je effizienter die elektrische Energie genutzt wird, desto geringer ist der Einfluss der Stromerzeugung auf die Ergebnisse pro Fahrzeugkilometer. So erhöht sich das Treibhausgaspotenzial beim BEV pro Fahrzeugkilometer um 133 g CO<sub>2</sub>-Äq. oder den Faktor 2.2, wenn statt Strom aus Windkraft Strom aus einem Gaskraftwerk verwendet wird. Bei FCEV hingegen steigt aufgrund des geringeren Wirkungsgrades das Treibhausgaspotenzial um 357 g CO<sub>2</sub>-Äq. pro Fahrzeugkilometer bzw. um den Faktor 3.4.

#### 4.2.2 Einfluss des elektrischer Fahranteils bei PHEV

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, wird die Umweltbelastung bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor von den direkten Emissionen, d.h. der Verbrennung fossiler Treibstoffe, dominiert. Für Plug-In Hybridfahrzeuge (PHEV) bedeutet dies, dass ihre Umweltbelastung in hohem Masse davon abhängt, wie häufig sie rein elektrisch betrieben werden. Dieser elektrische Fahranteil an der gesamten Fahrleistung in Prozent wird durch den so genannten Utility Factor (UF) angegeben. Der UF ist umso höher, je häufiger das Fahrzeug mit Strom aufgeladen und betrieben wird. Für die für 2021 modellierten PHEV wird ein UF von 47 % als Basis angenommen (siehe Tabelle 3). Dieser Wert basiert auf einer Studie des ICCT (Plötz, et al., 2022). Die Studie nutzt Daten von 5'808 private PHEV-Besitzer in Europa (hauptsächlich Deutschland) für Fahrzeuge, die zwischen 2011 und 2021 gebaut wurden. Für diese privaten PHEV-Fahrzeuge ergibt sich je nach Fahrzeugkategorie ein durchschnittlicher Utility Factor von 45 - 49 %. In Abbildung 16 werden für die PHEV jeweils neben den Ergebnissen für den verwendeten UF von 47 % auch noch die Werte für ein Szenario dargestellt, in welchem das Fahrzeug nie extern aufgeladen wird.

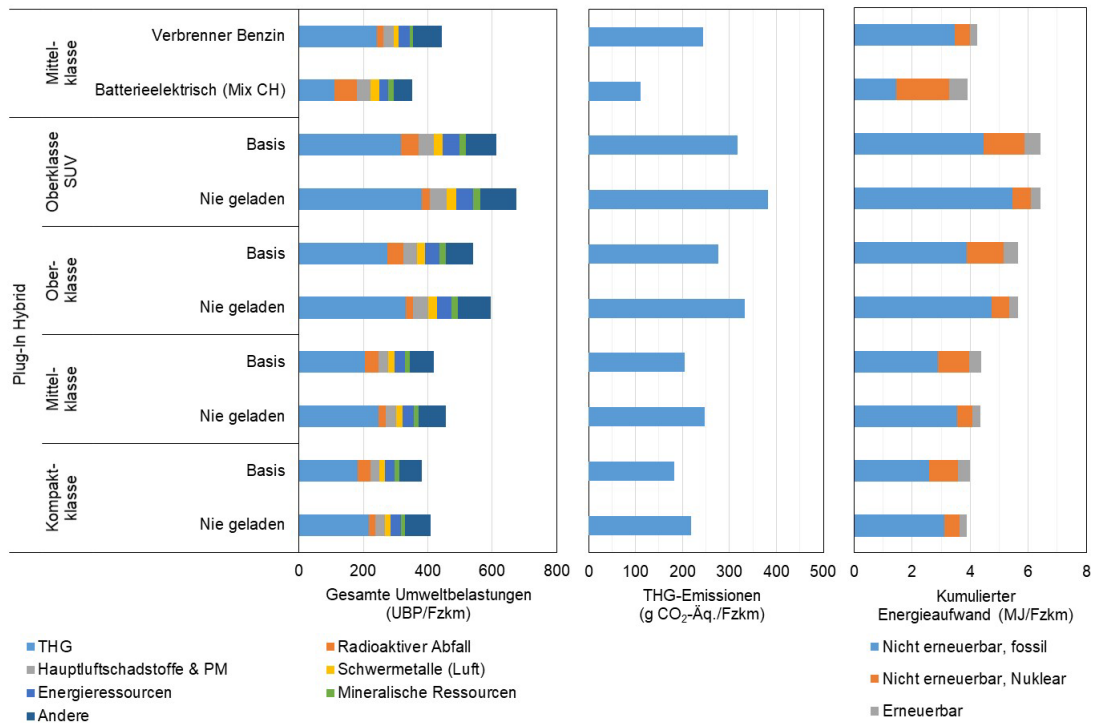


Abbildung 16: Einfluss Utility Factor (elektrischer Fahranteil an der gesamten Fahrleistung in Prozent) bei Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)

Mix CH = Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %)

Während PHEV mit dem angenommenen Basis-UF zu einer geringfügigen Reduktion der gesamten Umweltbelastung und der THG-Emissionen gegenüber dem entsprechenden Benzinfahrzeug führen, verursachen die gleichen PHEV, wenn sie nie extern aufgeladen werden, jeweils eine um 3 % höhere Umweltbelastung bzw. ein um 2 % höheres Treibhausgaspotenzial als das entsprechende Benzin betriebene Fahrzeug, was auf das höhere Gewicht der PHEV zurückzuführen ist. Im Vergleich zum BEV der gleichen Kategorie liegt die Umweltbelastung des nie geladenen Mittelklasse PHEV um 30 % und das Treibhausgaspotenzial um rund 120 % höher. Die Umweltbelastung bestimmter Nutzungsverhalten kann neu auch durch Eingabe des UF in der Excel-Tabelle unter [www.mobitool.ch](http://www.mobitool.ch) abgeschätzt werden.

#### 4.3 Einfluss der Bewertungsmethode

Die Auswahl der Methode zur Wirkungsabschätzung kann Auswirkungen auf die Rangfolge der Fahrzeuge haben. Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, behandelt keine der zur Verfügung stehenden Methoden der Wirkungsabschätzung alle umweltrelevanten Aspekte. Jedes Vorgehen bzw. jede Methode hat ihre Vor- und Nachteile. Kommen mehrerer Bewertungsmethoden zur Anwendung, lässt sich überprüfen, ob die Resultate stark von der Methode abhängig sind. Ist dies der Fall, so sollten die Abweichungen diskutiert und unterschiedliche Sichtweisen begründet werden. Die Methode der ökologischen Knappheit bezieht auch die politischen Ziele in den jeweiligen Umweltbereichen in die Bewertung mit ein. Andere vollaggregierende Methoden basieren grundsätzlich auf einer Schadensmodellierung, gekoppelt mit einer Aggregation, die nicht auf politischen Zielen basiert. Zur besseren Einordnung der in diesem Fachbericht präsentierten Ergebnisse stellt nachfolgende Grafik für ausgewählte Fahrzeuge sowohl die Ergebnisse für die Methode der ökologischen Knappheit als auch die Ergebnisse für die Methode Impact2002+ in der Version 2.15 von 2018 dar (siehe Kap. 2.2). Abbildung 17 zeigt die Umweltbelastung von Fahrzeugen der Kategorie «Mittelklasse» mit verschiedenen Antriebstechnologien gemäss den beiden erwähnten Bewertungsmethoden. Obwohl die Methoden unterschiedliche Bewertungskriterien anlegen, kommen beide Methoden zu sehr ähnlichen relativen Unterschieden und einer



nahezu identischen Rangfolge der einzelnen Antriebstechnologien. Auffällig ist vor allem der Unterschied zwischen dem BEV und dem FCEV, für welche jeweils erneuerbarer Strom zur Bereitstellung der Antriebsenergie (Strom bzw. zur Erzeugung des H<sub>2</sub>) verwendet wird. Die unterschiedliche Rangfolge wird verursacht durch Angaben im Inventar, die jeweils nur eine der beiden Methoden bewertet (z.B. die Emission einzelner Luftschadstoffe). Diese Angaben, die in Impact2002+ nicht bewertet werden, tragen in der Methode der ökologischen Knappheit 26 % (BEV) und 44 % (FCEV) zur gesamten Umweltbelastung bei. Zu nennen sind hier vor allem die für die Entsorgung von radioaktiven und sonstigen Abfällen nötigen Deponiekapazitäten und Platin als Ressource, da sich für diese die beiden Antriebe am deutlichsten unterscheiden. Umgekehrt tragen die Flüsse, die in der Methode der ökologischen Knappheit nicht bewertet werden, 8 % (BEV) bzw. 4 % (FCEV) zur Wirkung gemäss der Methode Impact2002+ bei. Allerdings ist der Unterschied zwischen den Antrieben hier sehr viel geringer.

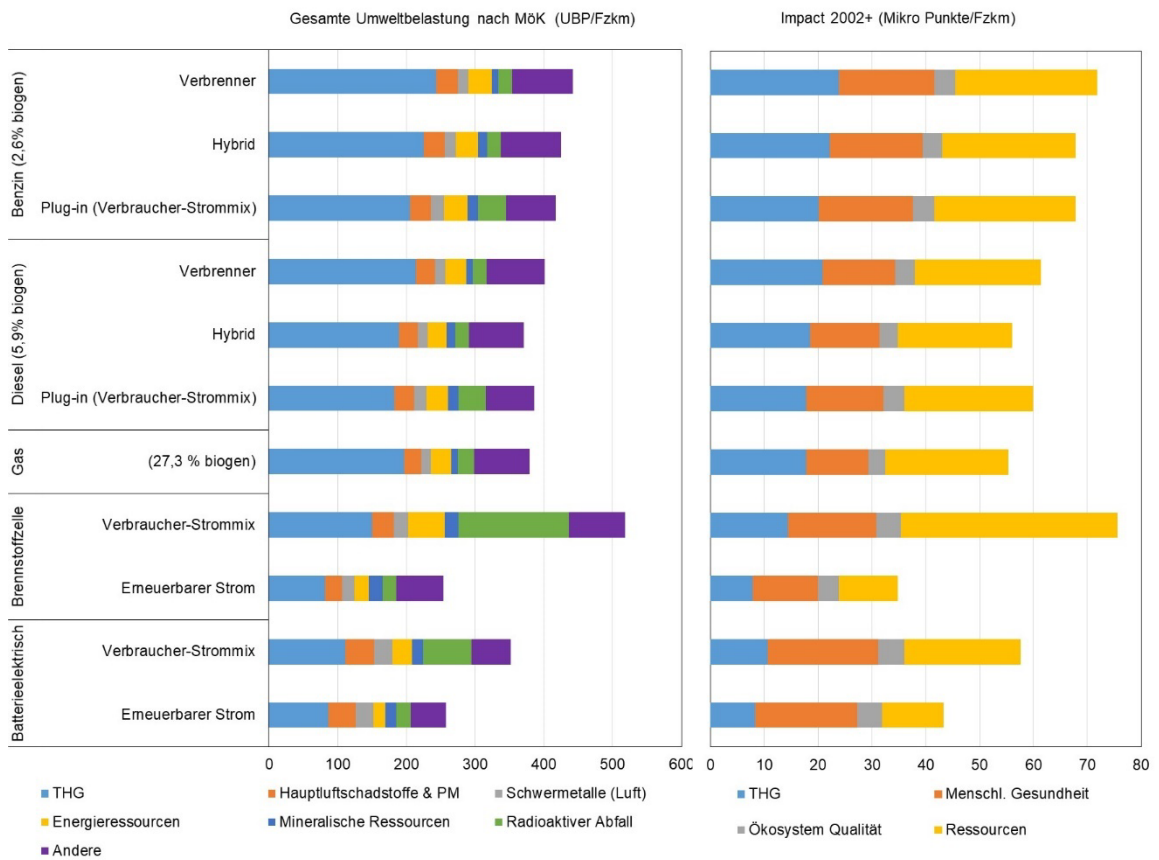


Abbildung 17: Einfluss der verwendeten Methode zur Wirkungsabschätzung (Mittelklassefahrzeug).  
 Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere.  
 Importe insgesamt 45 %)  
 Erneuerbarer Strom (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare).

#### 4.4 Zukünftige Fahrzeuge: Betrachtung spezifischer Aspekte

Neben den in Kap. 3.5. gezeigten Hauptszenarien WWB und ZERO-Basis werden im Folgenden noch weitere Entwicklungspotenziale von BEV dargestellt. Betrachtet werden eine Erhöhung der Lebensfahrleistung, eine Weiterverwendung der Batterie (Second-Life), ein höherer Anteil rezyklierter Stoffe in der Batterie (siehe Tabelle 6) sowie eine leichtere Batterie. Wie erwähnt sind in den vorliegenden Perspektiven mögliche Entwicklungen in Vorprozessen, wie zum Beispiel bei der Stahlherstellung, nicht berücksichtigt. Dadurch dürfte die Umweltwirkung in den folgenden Betrachtungen tendenziell überschätzt sein.

Die Auswirkungen der in Kapitel 2.4 beschriebenen Entwicklungspotenziale von BEV sind in Abbildung 18 und Abbildung 19 dargestellt. Ausgangsfahrzeug ist ein Mittelklasse-BEV, das mit dem Verbraucher-Strommix betrieben wird. Die verschiedenen Farben zeigen den Einfluss der untersuchten Parameter in den Jahren 2030, 2040 und 2050 im Szenario ZERO-Basis.

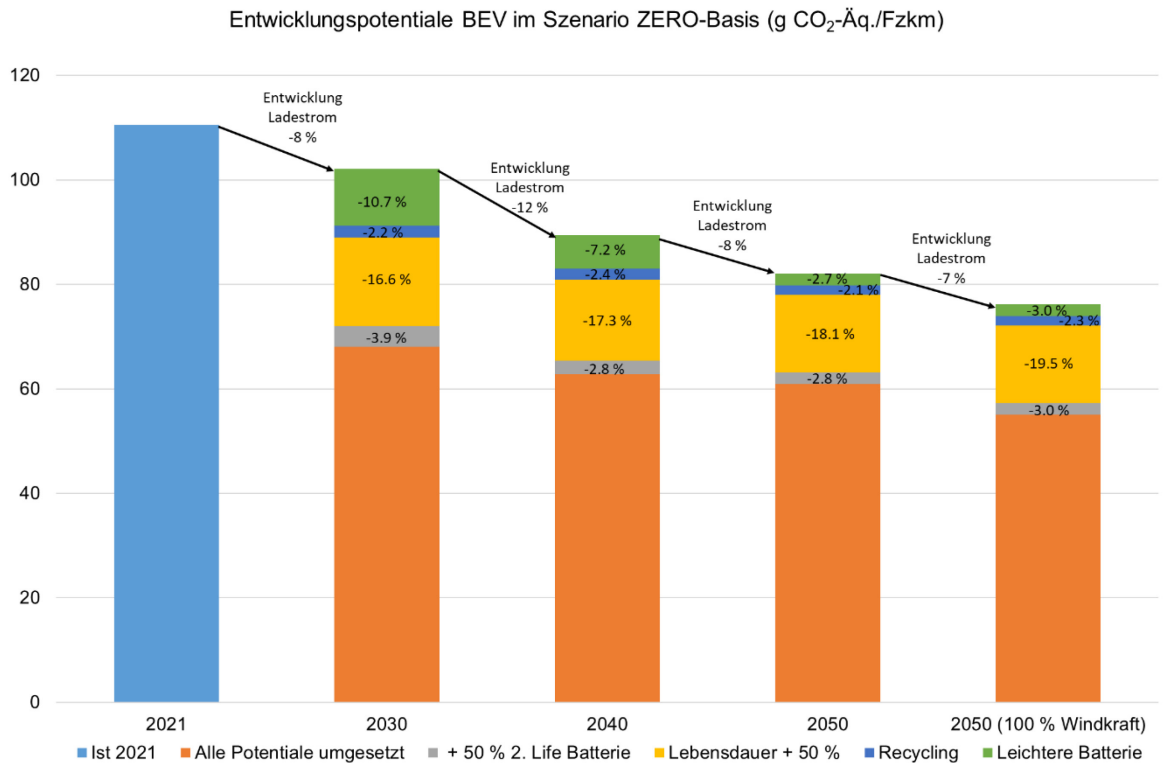


Abbildung 18: Entwicklungspotenziale BEV (THG)

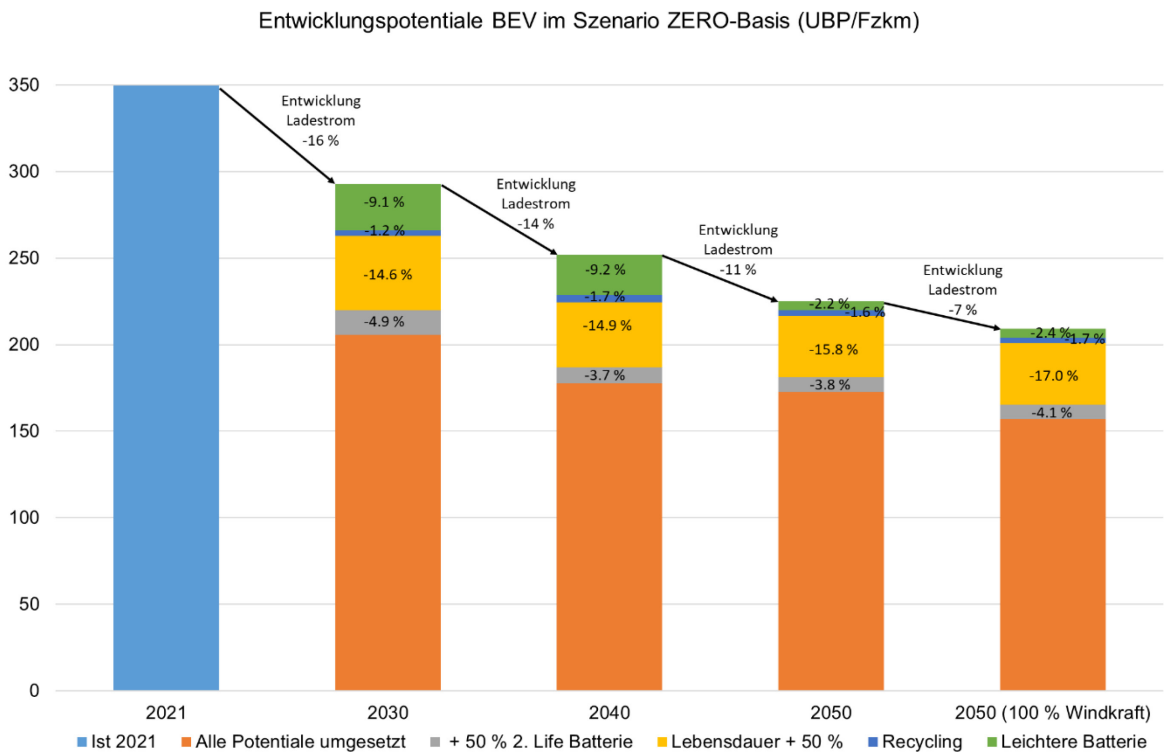


Abbildung 19: Entwicklungspotenziale von BEV (UBP)

Das grösste Potenzial bei den Treibhausgasemissionen sowie bei der gesamten Umweltbelastung stellt der längere Einsatz der Fahrzeuge (gelb) dar, also eine angenommene Lebensfahrleistung von 300'000 km anstelle von 200'000 km (+ 50 %). Aus den Abbildungen ebenfalls ersichtlich ist das Verbesserungspotenzial bestehender BEV durch die Entwicklung des Strommix. Lesebeispiel (Abbildung 19): Die Säule, beziehungsweise das Fahrzeug «2030» ohne Abzug der aufgeführten Potenziale, entspricht dem Fahrzeug von 2021, das mit dem Strommix von 2030 aufgeladen wird. Die orange Fläche entspricht den UBP des BEV 2030, wenn alle Potenziale umgesetzt sind. Die einzelnen Reduktionspotenziale für das BEV 2030 sind: - 4.9 % für den Einsatz der Batterie als Speicher, nachdem das Fahrzeug aus dem Verkehr genommen wurde (2. Life, grau), - 14.6 % für den längeren Einsatz des Fahrzeugs (gelb), - 1.2 % bei einem höheren Anteil rezyklierter Stoffe in der Batterie (blau) sowie - 9.1 % für eine leichtere Batterie (grün).

Die Treibhausgasemissionen können mit sämtlichen Reduktionspotenzialen im Vergleich zum Szenario ZERO-Basis 2050 in Abbildung 11 um weitere 30 % gesenkt werden. Die gesamte Umweltbelastung kann um 28 % reduziert werden.

Nicht modelliert ist der schwer abschätzbare Effekt der zusätzlichen Nachfrage nach Primärressourcen. Falls diese nicht durch Sekundärrohstoffe aus dem Recycling abgedeckt werden kann, müssten zusätzliche Quellen erschlossen werden, was eventuell zu einer höheren Umweltbelastung führt. Durch diese Nicht-Berücksichtigung wird die Auswirkung des Recyclings tendenziell unterschätzt. Weil in der Modellierung der Materialeinsatz in den Batterien abnimmt und der Strommix in der Batterieherstellung sich laufend verbessert, nimmt der Effekt des Recyclings auf die Umweltwirkung der Fahrzeuge in Zukunft ab. Auf Ebene der Batteriezellen ist der Einfluss von Recycling trotzdem deutlich sichtbar. Abbildung 20 zeigt den Einfluss des Recyclings auf die verschiedenen Kategorien von Umweltauswirkungen. Dargestellt wird die Umweltbelastung von vier Batteriezellen (NMC) im Jahr 2050:

- Die Batteriezelle aus dem Szenario WWB ohne Recycling (WWB 2050).
- Dieselbe Zelle, ohne Recycling, jedoch mit dem Strommix gemäss dem Szenario ZERO-Basis hergestellt (+el. Mix ZERO-Basis),
- Entspricht 2., jedoch mit den im Szenario ZERO-Basis unterstellten Recyclinganteilen von: Lithium 28 %, Nickel 23 % und Kobalt 67 % (+Recycling ZERO-Basis).
- Entspricht 2., mit 100 % rezyklertem Lithium, Nickel und Kobalt (+100 % Recycling).

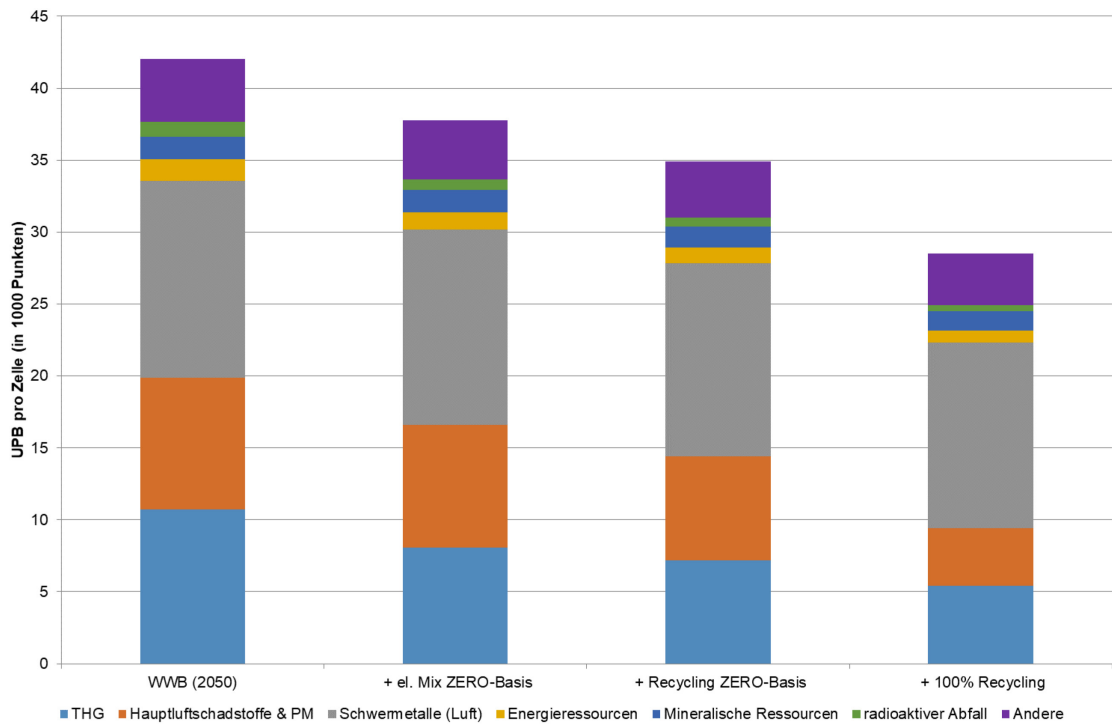


Abbildung 20: Umweltbelastung einer Batteriezelle (NMC) nach Wirkungskategorie.

Die Auswertung der Umweltbelastung auf der Ebene der Batteriezellen zeigt, dass der Einsatz von zu 100 % rezykliertem Lithium, Nickel und Kobalt die Umweltbelastung der Zellherstellung um etwa ein Drittel verringern lässt (Säule ganz rechts). Die grössten Anteile an der Umweltbelastung von Batteriezellen haben die Emissionen von Schwermetallen in die Luft (grau), von Treibhausgasen (hellblau) sowie der Hauptluftschadstoffe (orange). Weil durch das Recycling weniger Ressourcen abgebaut werden müssen, verringern sich durch einen höheren Recyclinganteil insbesondere die Luftschadstoffe sowie die THG-Emissionen.

## 5 Schlussfolgerungen

Basierend auf den neuen Inventaren und den hier vorgestellten Ergebnissen zu den drei Parametern «Gesamte Umweltbelastung», «Treibhausgasemissionen» und «Kumulierter Energieaufwand» lässt sich zum Vergleich von Personenwagen mit verschiedenen Antriebssystemen folgendes feststellen:

- Personenwagen mit batterieelektrischem Antrieb verursachen heute deutlich weniger **Treibhausgasemissionen** als vergleichbare Personenwagen mit Verbrennungsmotoren. Brennstoffzellenfahrzeuge, deren Wasserstoff erneuerbar hergestellt wird, liegen bei den Treibhausgasemissionen im Bereich der batterieelektrischen Fahrzeuge.
- Bei der **gesamten Umweltbelastung**, gemessen in Umweltbelastungspunkten (UBP) sind die Unterschiede zwischen den Antriebsformen Verbrennungs- und Elektromotoren weniger ausgeprägt. Mit erneuerbarem Strom geladene batterieelektrische Personenwagen und Brennstoffzellenfahrzeugen, die mit Wasserstoff aus 100 % erneuerbarem Strom betrieben werden, verursachen am wenigsten UBP.
- Mit dem Verbrauchstrommix betriebene batterieelektrische Personenwagen haben eine geringere Umweltbelastung (in UBP) als die Personenwagen mit Verbrennungsmotoren (auch Plug-In- / Hybridfahrzeuge).
- Werden Brennstoffzellenfahrzeuge mit Wasserstoff betankt, der mittels Verbraucher-Strommix hergestellt wurde, belasten sie die gesamte Umwelt deutlich am stärksten. Ihre Treibhausgasemissionen sind etwas tiefer als diejenigen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren (auch Plug-In- / Hybridfahrzeuge), aber höher als diejenigen der mit Verbraucher-Strommix geladenen batterieelektrischen Fahrzeuge.
- Der **kumulierte Energieaufwand** ist bei Brennstoffzellenfahrzeugen, deren Wasserstoff mit dem Verbraucher-Strommix hergestellt wird, etwa doppelt so hoch wie der kumulierte Energieaufwand von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren oder von mit Verbraucherstrom geladenen batterieelektrischen Fahrzeugen. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen, die mit erneuerbarem Strom geladen werden, ist der kumulierte Energieaufwand deutlich am tiefsten.

Der Vergleich verschiedener Fahrzeuggrössen bzw. des Fahrzeuggewichtes zeigt:

- Bei allen Antriebsarten verursachen schwere Fahrzeuge mehr Treibhausgasemissionen, eine höhere gesamte Umweltbelastung sowie einen höheren kumulierten Energieaufwand als leichte Fahrzeuge.
- Batterieelektrische Personenwagen verursachen weniger Treibhausgasemissionen und eine geringere gesamte Umweltbelastung als andere Fahrzeuge der gleichen Gewichtsklasse.

Der Vergleich verschiedener Verkehrsmittel zeigt:

- Unabhängig von der Antriebsart verursachen Personenwagen auf allen Strecken eine weitaus höhere Umweltbelastung als die Bahn, das Tram, der Bus oder das (Elektro-)Velo.

Die betrachteten zukünftigen Entwicklungsszenarien zeigen:

- Für batterieelektrische Personenwagen wird im Szenario ZERO-Basis eine Reduktion der gesamten Umweltbelastung bis 2050 um 38 % abgeschätzt. Sie liegen damit deutlich tiefer als die anderen Antriebssysteme 2050.

- Personenwagen mit batterieelektrischem Antrieb verursachen in den untersuchten Zukunftsszenarien auch weniger Treibhausgasemissionen als vergleichbare Personenwagen mit anderen Antriebstechnologien.
- Wenn bei der Herstellung von synthetischem Diesel ausschliesslich Windenergie oder ein Strom mit ähnlich tiefem Treibhausgaspotenzial eingesetzt wird, kann damit eine deutliche Reduktion der Treibhausgasemissionen erzielt werden. Die THG-Emissionen und die gesamte Umweltbelastung liegen jedoch über denjenigen von batterieelektrischen Fahrzeugen mit derselben Energieherkunft.
- Das grösste Reduktionspotenzial von Treibhausgasen bei batterieelektrischen Fahrzeugen wird – neben der prognostizierten Entwicklung beim Ladestrom – bei einer deutlich längeren Lebensfahrleistung geortet.

Daraus lassen sich verschiedene **Möglichkeiten für eine Reduktion** der gesamten Umweltbelastung, der Treibhausgasemissionen sowie des kumulierten Energieverbrauchs von Personenwagen mit verschiedenen Antriebssystemen schlussfolgern:

1. Das grösste Potenzial zeigen die Resultate der Verkehrsmittelvergleiche: Die Umweltvorteile von öffentlichem und Fahrradverkehr sind auch im Vergleich zu Personenwagen mit alternativen Antrieben gross.
2. Beim Einsatz von Personenwagen kann mit der Wahl eines batterieelektrischen Antriebssystems die Umweltbelastung pro Kilometer deutlich geringer gehalten werden als mit anderen Antriebssystemen.
3. Eine wichtige Rolle spielt erneuerbarer Strom, sowohl als Ladestrom als auch zur Herstellung von Wasserstoff sowie in den gesamten Vorprozessen (Fahrzeugproduktion, Infrastrukturen etc.).
4. Des Weiteren sind Fahrzeuggrösse bzw. -gewicht wesentliche Einflussgrössen.

Weitere Verbesserungsmöglichkeiten zur Senkung der Umweltauswirkungen von Personenwagen sind aufgrund der Resultate des Berichtes eine möglichst lange Lebensfahrleistung von batterieelektrischen Fahrzeugen, das regelmässige Laden von Plug-In-Fahrzeugen sowie Fortschritte bezüglich Materialrecycling im Sinne einer Kreislaufwirtschaft.

Um die Qualität der Lebenszyklusanalyse zu erhalten und zu verbessern, ist die laufende Aktualisierung der Inventardaten des Bundes notwendig. Die für diesen Bericht verwendeten Inventardaten stehen für weitere Anwendungen zur Verfügung, beispielsweise in der Excel-Tabelle unter [www.mobitool.ch](http://www.mobitool.ch).

## 6 Verzeichnisse

### Abbildungsverzeichnis

Abbildung A1: Siehe Abbildung 5.....	4
Abbildung 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen des Personenverkehrs (Personenwagen, Motorräder, Reisebusse) seit 1990, zusammen mit den relevanten Kenngrössen Fahrzeugbestand des Personenverkehrs und Fahrleistung (km) des Personenverkehrs. Auch gezeigt sind die Treibhausgasemissionen pro Fahrleistung des Personenverkehrs (BAFU, 2022). .....	9
Abbildung 2: Neuzulassungen Personenwagen nach Antrieb 2022 (ASTRA, 2022). .....	10
Abbildung 3: Die 4 Phasen einer Ökobilanz angepasst nach ISO 14040.....	12
Abbildung 4: Ablaufschema und Inhalt der Methode der ökologischen Knappheit.....	14
Abbildung 5: Einfluss der verschiedenen Antriebssysteme auf die gesamte Umweltbelastung, die Emission von Treibhausgasen und den kumulierten Energieaufwand pro Fahrzeugkilometer eines Mittelklasse Personenwagens (1250-1750 kg, Beispielfahrzeuge siehe Tabelle 2, Zahlenwerte siehe Tabelle 12). Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %) Erneuerbarer Strom (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare). Hinweis: Die Umweltbelastung bestimmter Fahrzeuge sowie ein individueller Strommix können durch Eingabe der wichtigsten Parameter in der Excel-Tabelle unter <a href="http://www.mobitool.ch">www.mobitool.ch</a> abgeschätzt werden. NCA: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid NMC: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid LFP: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Eisenphosphat (LiFePO <sub>4</sub> ) .....	25
Abbildung 6: Einfluss der verschiedenen Antriebssysteme auf die gesamte Umweltbelastung, pro Fahrzeugkilometer eines Mittelklasse Personenwagens (1250-1750 kg, Beispielfahrzeuge siehe Tabelle 2) aufgeteilt auf die verschiedenen Wirkungskategorien. Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %) Erneuerbarer Strommix (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare). Hinweis: Die Umweltbelastung bestimmter Fahrzeuge sowie ein individueller Strommix kann durch Eingabe der wichtigsten Parameter in der Excel-Tabelle unter <a href="http://www.mobitool.ch">www.mobitool.ch</a> abgeschätzt werden. NCA: Lithium-Ionen-Akkumulators mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid NMC: Lithium-Ionen-Akkumulators mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid LFP: Lithium-Ionen-Akkumulators mit einer Kathode aus Lithium-Eisenphosphat (LiFePO <sub>4</sub> ) .....	27
Abbildung 7: Treibhausgasemissionen (THG), gesamte Umweltbelastung (UBP) und kumulierter Energieaufwand (KEA) als Funktionen der Fahrleistung Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %) Erneuerbarer Strom (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare).....	29
Abbildung 8: Einfluss der Fahrzeuggrösse und des Fahrzeuggewichts bei Personenwagen auf die gesamte Umweltbelastung, die Emission von Treibhausgasen und den kumulierten Energieaufwand (Beispielfahrzeuge siehe Tab. 2, Batteriechemie: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid (NCA). Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %).....	31
Abbildung 9: Treibhausgasemissionen pro Person für eine Strecke von 5 km, 30 km und 100 km bei durchschnittlichem Belegungsgrad. Angenommene Belegungsgrade: Fernverkehr Bahn = 33 %, S-Bahn = 26 %, PW = 1.6 Personen, Zweiräder = 1 Person (Daten siehe Tabelle 18). NCA: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid.....	33
Abbildung 10: Umweltbelastungspunkte pro Person für eine Strecke von 5 km, 30 km und 100 km bei durchschnittlichem Belegungsgrad. Angenommene Belegungsgrade: Fernverkehr Bahn = 33 %, S-Bahn = 26 %, PW = 1.6 Personen, Zweiräder = 1 Person (Daten siehe Tabelle 19) NCA: Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit einer Kathode aus Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid.....	34

Abbildung 11: THG-Potenzial eines Mittelklassefahrzeugs mit verschiedenen Antriebstechnologien in den Szenarien «Weiter Wie Bisher» (WWB) und «Netto Null» in der Basisvariante (ZERO-Basis) in g CO <sub>2</sub> -Äquivalenten. * ab 2030, Herstellung im umliegenden Ausland mit dem jeweiligen Strommix (S. Anhang 7.3).....	35
Abbildung 12: Gesamte Umweltbelastung eines Mittelklassefahrzeugs mit verschiedenen Antriebstechnologien in den «Weiter Wie Bisher» (WWB) und «Netto Null» in der Basisvariante (ZERO-Basis) in Umweltbelastungspunkten (UBP). * ab 2030, Herstellung im umliegenden Ausland mit dem jeweiligen Strommix (S. Anhang 7.3).....	36
Abbildung 13: Sensitivität der Energieherkunft auf das THG-Potenzial verschiedener Antriebstechnologien.....	37
Abbildung 14: Sensitivität der Energieherkunft auf die Umweltbelastung in UBP verschiedener Antriebstechnologien.....	37
Abbildung 15: Einfluss der Stromherkunft auf die gesamte Umweltbelastung (aufgelöst nach Arten der Umweltwirkung), auf die Treibhausgasemissionen und auf den kumulierten Energieaufwand. Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %).....	42
Abbildung 16: Einfluss Utility Factor (elektrischer Fahranteil an der gesamten Fahrleistung in Prozent) bei Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Mix CH = Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %).....	44
Abbildung 17: Einfluss der verwendeten Methode zur Wirkungsabschätzung (Mittelklassefahrzeug). Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %) Erneuerbarer Strom (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare). .....	45
Abbildung 18: Entwicklungspotenziale BEV (THG).....	46
Abbildung 19: Entwicklungspotenziale von BEV (UBP).....	46
Abbildung 20: Umweltbelastung einer Batteriezelle (NMC) nach Wirkungskategorie. ....	48

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Für die Erstellung der Fahrzeuginventare verwendeten Datenquellen.....	16
Tabelle 2: Fahrzeugkategorien nach (Sacchi & Bauer, 2021), Elektrofahrzeuge sind in Spalte «Beispiele» fett markiert.....	17
Tabelle 3: Relevante Annahmen pro Fahrzeugkategorie (Sacchi & Bauer, 2021).....	18
Tabelle 4: Verbraucher-Strommix Schweiz 2018 und erneuerbarer Strom, basierend auf der Integration der Stundenwerte von Produktion und kommerziellem Handel (Frischknecht, 2021).....	20
Tabelle 5: Umweltbelastung in UBP, Emission von Treibhausgasen und kumulierter Energieaufwand des in den Inventaren verwendeten Stromes pro kWh je nach Produktionstechnologie bzw. Mix	20
Tabelle 6: Unterschiede in den Hauptszenarien WWB und ZERO-Basis.....	21
Tabelle 7: Für die Modellierung der Zukünftigen Fahrzeuge verwendete Datenquellen .....	22
Tabelle 8: Untersuchte Parameter Zukunftsperspektiven.....	22
Tabelle 9: THG-Emissionen der verschiedenen Grössenklassen in Relation zum jeweilige Mittelklasse-PW.....	32
Tabelle 10: THG-Reduktionspotenziale (Gegenwart) im Vergleich zum jeweiligen Referenzfahrzeug (Benzin) in ausgewählten Studien (n.V.: nicht Verfügbar).....	41
Tabelle 11: Annahmen pro Fahrzeugkategorie (Sacchi & Bauer, 2021) .....	57
Tabelle 12: Zu Abbildung A1 und Abbildung 5 Einfluss der verschiedenen Antriebssysteme auf die gesamte Umweltbelastung, Treibhausgase und den kumulierten Energieaufwand pro Fahrzeugkilometer eines Mittelklasse PW. ....	58



Tabelle 13: Zu Abbildung 6 Einfluss der verschiedenen Antriebssysteme auf die gesamte Umweltbelastung, pro Fahrzeugkilometer eines Mittelklasse Personenwagens (1250-1750 kg, Beispielfahrzeuge siehe Tabelle 2) aufgeteilt auf die verschiedenen Umweltkategorien.....	61
Tabelle 14: Zu Abbildung 7 Treibhausgasemissionen (THG), gesamte Umweltbelastung (UBP) und kumulierter Energieaufwand (KEA) als Funktionen der Fahrleistung (Mittelklasse) .....	62
Tabelle 15: Zu Abbildung 8: Einfluss der Fahrzeuggrösse und des Fahrzeuggewichts bei Personenwagen auf die Emission von Treibhausgasen (g CO <sub>2</sub> -Äq./ Fzkm) .....	63
Tabelle 16: Zu Abbildung 8: Einfluss der Fahrzeuggrösse und des Fahrzeuggewichts bei Personenwagen auf die gesamte Umweltbelastung (UBP/Fzkm) .....	64
Tabelle 17: Zu Abbildung 8: Einfluss der Fahrzeuggrösse und des Fahrzeuggewichts bei Personenwagen auf den kumulierten Energieaufwand (KEA, MJ/Fzkm).....	65
Tabelle 18: Zu Abbildung 9: Treibhausgas-Potenzial pro Person für eine Strecke von 5 km, 30 km und 100 km bei durchschnittlichem Belegungsgrad. Angenommene Belegungsgrade: Fernverkehr Bahn = 33 %, S-Bahn = 26 %, PW = 1.6 Personen, Zweiräder = 1 Person.....	66
Tabelle 19: Zu Abbildung 10: Umweltbelastungspunkte pro Person für eine Strecke von 5 km, 30 km und 100 km bei durchschnittlichem Belegungsgrad. Angenommene Belegungsgrade: Fernverkehr Bahn = 33 %, S-Bahn = 26 %, PW = 1.6 Personen, Zweiräder = 1 Person.....	66
Tabelle 20: Fahrleistung in km, an der das jeweilig Fahrzeug die gleiche Umweltwirkung aufweist wie der mit Benzin betriebene Mittelklasse PW. Oberhalb dieser Fahrleistung ist die Umweltwirkung des mit Benzin betriebenen Mittelklasse PW höher als die des Vergleichsfahrzeugs (Abb. 7) .....	67
Tabelle 21: Zu Abbildung 11, Abbildung 12 .....	67
Tabelle 22: zu Abbildung 13, Abbildung 14.....	68
Tabelle 23: zu Abbildung 15: Einfluss der Stromherkunft für den Anteil der mittels Stroms bereitgestellten Fahrenergie auf die gesamte Umweltbelastung (aufgelöst nach Arten der Umweltwirkung), auf die Treibhausgasemissionen und auf den kumulierten Energieaufwand (Mittelklasse Fahrzeug).....	68
Tabelle 24: Abbildung 16: Einfluss Utility Factor (elektrischer Fahranteil an der gesamten Fahrleistung in Prozent) bei Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Mix CH = Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %).....	69
Tabelle 25: Abbildung 17: Einfluss der verwendeten Methode zur Wirkungsabschätzung (Mittelklassefahrzeug). Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %) Erneuerbarer Strom (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare).....	70
Tabelle 26: Zu Abbildung 18 und Abbildung 19 .....	71
Tabelle 27: Zu Abbildung 20 .....	71
Tabelle 28: Electricity consumption mix for Switzerland, following the EP 2050+ Business-As-Usual scenario (PJ) (Sacchi R. B., 2022).....	72
Tabelle 29: Electricity consumption mix for Switzerland, following the EP 2050+ ZERO Basis scenario (PJ).....	72
Tabelle 30: Electricity production mix for neighbouring countries, following the EP 2050+ Business-As-Usual scenario (PJ) (Sacchi R. B., 2022) .....	73
Tabelle 31: Electricity production mix for neighbouring countries, following the EP 2050+ ZERO Basis scenario (PJ) (Sacchi R. B., 2022).....	73
Tabelle 32: Allocation of Fischer-Tropsch syncrude production process between fuel products. The green shaded row represents the synthetic diesel product flow (Sacchi R. B., 2022, S. 15) .....	74
Tabelle 33: Allocation of synthetic methanol production process between fuel products. The green shaded row represents the synthetic gasoline product flow (Sacchi R. B., 2022, S. 15) .....	74

## Literaturverzeichnis

- Albrecht, U., Schmidt, P., Weindorf, W., Wurster, R., & Zittel, W. (2013). *Kraftstoffstudie. Zukünftige Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren und Gasturbinen*. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV).
- ASTRA. (2022). *Fahrzeugdaten*. Von [https://files.admin.ch/astra\\_ffr/mofis/Datenlieferungs-Kunden/opendata/1000-Fahrzeuge\\_IVZ/1200-Neuzulassungen/1220-Neuzulassungsbericht\\_woechentlich/1222-Vorjahresdaten/](https://files.admin.ch/astra_ffr/mofis/Datenlieferungs-Kunden/opendata/1000-Fahrzeuge_IVZ/1200-Neuzulassungen/1220-Neuzulassungsbericht_woechentlich/1222-Vorjahresdaten/)
- BAFU. (2021). *Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz*. Umwelt-Wissen Nr. 2121.
- BAFU. (2022). *Kenngrossen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz 1990–2020*. Bundesamt für Umwelt.
- BFE. (2021). *Energieperspektiven 2050+*. Von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.html> abgerufen
- BFE. (2022). *Energieetikette für Personenwagen Umweltkennwerte 2022 der Strom- und Treibstoffbereitstellung*.
- BFS. (2022A). *Leistungen im Personenverkehr*. Von <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/personenverkehr/leistungen.html>
- BFS. (2022B). *Strassenfahrzeuge – Bestand, Motorisierungsgrad*. Von <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/fahrzeuge/strassenfahrzeuge-bestand-motorisierungsgrad.html> abgerufen
- Bieker, G. (2021). *A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars*. ICCT.
- Cox, B., Bauer, C., Mendoza Beltran, A., van Vuuren, D., & Mutel, C. (2020). *Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios*. Applied Energy 269.
- Dornoff, J., Tietge, U., & Mock, P. (2020). *On The Way To 'Real World' CO2 Values: The European Passenger Car Market In Its First Year After Introducing The WLTP*. ICCT.
- ecoinvent report No. 3. (2010). *Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods (Simapro implementierten Version 1.09)*. St. Gallen: ecoinvent.
- EMIS. (2022). *Luftschadstoffemissionen der Schweiz 1980 - 2020 nach dem territorial-Prinzip*. BAFU.
- European Environment Agency. (2019). *Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019*. Von <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>
- Frischknecht, R. A. (2021). *Electricity Mixes in Life Cycle Assessments*. BERN: BFE.
- Hank, C., Lazar, L., Mantei, F., Ouda, M., White, R., Smolinka, T., . . . Henning, H.-M. (2019). Comparative well-to-wheel life cycle assessment of OME3–5 synfuel production via the power-to-liquid pathway. *Sustainable Energy Fuels*, 3, S. 3219-3233.

- HBEFA. (2021). *Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA)*. Version 4.1. Von <https://www.hbefa.net/e/index.html>
- ICCT. (2022). *More bang for the buck: A comparison of the life-cycle greenhouse gas emission benefits and incentives of plug-in hybrid and battery electric vehicles in Germany*.
- IPCC. (2013). *Fifth Assessment Report. Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing (Simapro implementierten Version 1.02)*. IPCC.
- IPCC. (2022). *IPCC Sixth Assessment Report. Chapter 10: Transport*. IPCC.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., & Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. (Version 2.15 in Simapro). *Int J Life Cycle Assessment*, 324–330.
- Plötz, P., Link, S., Ringelschwendner, H., Keller, M., Moll, C., Bieker, G., . . . Mock, P. (2022). *REAL-WORLD USAGE OF PLUG-IN HYBRID VEHICLES IN EUROPE*. Berlin: ICCT.
- PSI. (2020). *Umweltauswirkungen von Personenwagen - Heute und Morgen*. Von <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/publikationen.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWWRtaW4uY2gvZGUvcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvOTQ2MA==.html>
- Sacchi, R. B. (2022). *Prospective life-cycle inventories for passenger cars in Switzerland*. Villigen, Switzerland: Paul Scherrer Institut.
- Sacchi, R., & Bauer, C. (2021). *Life cycle inventories for on-road vehicles*. Villigen, Switzerland: Paul Scherrer Institut.
- Sacchi, R., Bauer, C., Cox, B., & Mutel, C. (2022). When, where and how can the electrification of passenger cars reduce greenhouse gas emissions? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 162.
- treeze. (2018). *Aktualisierung Umweltaspekte von Elektroautos*. Ausgearbeitet von: Rolf Frischknecht, Annika Messmer, Philippe Stolz. Uster: Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).
- UVEK Datenbestand. (2018). *UVEK Datenbestand 2018 basierend auf ecoinvent Datenbestand Version 2.2 mit angepassten Sachbilanzdaten*. Von <https://db.ecoinvent.org/index.php>
- van der Giesen, C., Kleijn, R., & Kramer, G. (2014). Energy and climate impacts of producing synthetic hydrocarbon fuels from CO<sub>2</sub>. *Environmental science & technology*, 48(12), S. 7111-7121.
- Wietschel, M., Link, S., Biemann, K., & Helms, H. (2022). *Langfristige Umweltbilanz und Zukunftspotenzial alternativer Antriebstechnologien*. Berlin: Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI).
- Zhang, X. C. (2017). Life Cycle Assessment of Power-to-Gas: Approaches, System Variations and Their Environmental Implications. *Applied Energy*(190), S. 326-38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ap>

**Abkürzungsverzeichnis**

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BEV	Batterieelektrische Fahrzeuge bzw. Battery Electric Vehicles
BFE	Bundesamt für Energie
BFS	Bundesamt für Statistik
Co	Kobalt
CO <sub>2</sub> -Äq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
EEA	Europäische Umweltagentur
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeuge bzw. Fuel Cell Electric Vehicles ist ein Fahrzeug dessen elektrische Energie aus z.B. dem Energieträger Wasserstoff, aus Alkoholen (Methanol, Ethanol) oder aus Ammoniak in einer Brennstoffzelle erzeugt und direkt mit einem Elektroantrieb in Bewegung umgewandelt oder zeitweise in einer Antriebsbatterie zwischengespeichert wird
Fzkm	Fahrzeugkilometer (Fz-km, Fzkm): Massgrößen der Fahr- oder Betriebsleistung eines Fahrzeuges. Ein Fahrzeugkilometer entspricht der Bewegung eines Fahrzeuges über die Entfernung von einem Kilometer
KEA	kumulierter Energieaufwand oder Cumulative Energy Demand (CED): Definition nach VDI-Richtlinie 4600: «die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Guts (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann».
HEV	Fahrzeuge mit Hybridantrieb bzw. Hybrid Electric Vehicles laut Richtlinie 2007/46/EG „Hybridelektrofahrzeug“ ein Hybridfahrzeug, das zum Zwecke des mechanischen Antriebs aus folgenden Quellen im Fahrzeug gespeicherte Energie/Leistung bezieht: Einem Betriebskraftstoff und einer Speichereinrichtung für elektrische Energie/Leistung.
H <sub>2</sub>	Wasserstoff
ICE	Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor bzw. Internal Combustion Engine Fahrzeug mit einem Antriebsstrang, der ausschließlich Verbrennungsmotoren als Energiewandler enthält.
LCI	Life Cycle Inventory, Lebenszyklusinventare
LFP	Lithium-Eisenphosphat verwendet als Kathodenmaterial in Antriebsbatterien
Li	Lithium
MJ	Megajoule = 1'000'000 Joule
NCA	Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxide verwendet als Kathodenmaterial in Antriebsbatterien
Ni	Nickel
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxide verwendet als Kathodenmaterial in Antriebsbatterien
NO <sub>x</sub> , PM	Stickstoffoxide, Feinstaub (Particle Matter)
ÖV	Öffentlicher Verkehr
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle oder Plug-In-Hybrid ist ein Fahrzeug mit Hybridantrieb. Die Batterie ist meist grösser als beim HEV und kann sowohl über den Verbrennungsmotor als auch mit einem Stecker am Stromnetz geladen werden kann.
PW	Personenwagen
TS	Treibstoffe
UBP	Masseinheit der Methode der ökologischen Knappheit. Zentrale Grösse der Methode sind die Ökofaktoren, welche die Umweltbelastung einer Schadstoffemission resp. Ressourcenentnahme in der Einheit UBP pro Mengeneinheit angeben.
UF	Utility Factor, elektrischer Fahranteil
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure

## 7 Anhang

## 7.1 Annahmen zu den Fahrzeugkategorien

Tabelle 11: Annahmen pro Fahrzeugkategorie (Sacchi &amp; Bauer, 2021)

Kategorie	Treibstoff	Antrieb (Batteriechemie)	Leergewicht	Batterie-Kapazität	Verbrauch (in Liter Benzin/Diesel bzw. kg Gas; kWh pro 100 km; el. Fahranteil (UF) in %)			Verbrauch (Energie in MJ)	Fahrleistung	
					(l bzw. kg/100km)	(kWh/100km)	(%)			
			(kg)	(kWh)				(MJ/100km)	(km)	
Mikro	Strom	BEV (NCA)	528	17	-	10.7	100	38.6	60'000	
Kompakt	Benzin	ICE	1180	-	5.3	-	-	168.5	200'000	
		PHEV	1308	7	2.7	8.2	47	116.7	200'000	
	Diesel	ICE	1216	-	4.0	-	-	142.5	200'000	
		PHEV	1293	7	2.3	8.2	47	112.0	200'000	
	Strom	BEV (NCA)	1284	40	-	16.1	100	58.0	200'000	
Mittelklasse	Benzin	ICE	1373	-	6.2	-	-	197.2	200'000	
		HEV	1445	2	5.4	-	-	171.2	200'000	
		PHEV	1438	10	3.2	8.7	47	132.0	200'000	
	Diesel	ICE	1428	-	4.8	-	-	174.1	200'000	
		HEV	1425	2	3.9	-	-	142.8	200'000	
		PHEV	1432	10	2.7	8.7	47	131.7	200'000	
	Gas	ICE	1364	-	4.6	-	-	220.7	200'000	
	H2	FCEV	1447	- <sup>14</sup>	1.0	-	-	121.5	200'000	
	Strom	BEV (LFP)	1538	43	-	18.0	100	64.8	200'000	
		BEV (NCA)	1538	52	-	18.0	100	64.8	200'000	
		BEV (NMC)	1538	46	-	18.0	100	64.8	200'000	
	Oberklasse	Benzin	ICE	1788	-	8.4	-	-	264.9	200'000
			PHEV	2021	17	4.3	10.8	47	174.3	200'000
Diesel		ICE	1815	-	6.5	-	-	236.4	200'000	
		PHEV	2008	17	3.9	10.8	47	182.5	200'000	
Strom	BEV (NCA)	1909	83	-	20.7	100	74.5	200'000		
Oberklasse SUV	Benzin	ICE	2120	-	9.7	-	-	308.5	200'000	
		PHEV	2355	16	4.9	12.5	47	201.6	200'000	
	Diesel	ICE	2149	-	7.8	-	-	286.2	200'000	
	Strom	BEV (NCA)	2215	95	-	24.0	100	86.4	200'000	

<sup>14</sup> FCEV verfügen über eine mit HEV vergleichbare Batterie, was in der Modellierung nicht berücksichtigt wurde (S.a. Sacchi (2021), S. 72)

## 7.2 Datentabellen zu den Abbildungen

Tabelle 12: Zu Abbildung A1 und Abbildung 5 Einfluss der verschiedenen Antriebssysteme auf die gesamte Umweltbelastung, Treibhausgase und den kumulierten Energieaufwand pro Fahrzeugkilometer eines Mittelklasse PW.

				Fahrzeug	Direkte Emissionen	Bereitstellung Energieträger	Unterhalt Fahrzeug	Strasse	Total
Gesamte Umweltbelastung nach M <sub>0</sub> K (UBP/Fzkm)	Benzin (2,6 % biogen)		Verbrenner	82	195	96	10	59	442
			Hybrid	97	172	83	11	60	423
			Plug-in (Verbraucher-Strommix <sup>1</sup> )	110	125	110	11	60	416
	Diesel (5,9 % biogen)		Verbrenner	85	172	72	11	60	400
			Hybrid	96	144	59	11	60	370
			Plug-in (Verbraucher-Strommix <sup>1</sup> )	110	110	94	11	60	385
	Gas		(27,3 % biogen)	86	155	68	10	59	378
	Brennstoffzelle		Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	115	17	316	11	61	520
			Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	114	16	51	11	60	252
	Batterie	NCA	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	151	17	109	12	62	351
			Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	151	17	16	12	62	258
		NMC	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	147	17	109	12	62	347
			Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	147	17	16	12	62	254
		LFP	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	140	17	109	12	62	340
			Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	140	17	16	12	62	247

<sup>1</sup> Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %);  
<sup>2</sup> Erneuerbarer Strom (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare)

				Fahrzeug	Direkte Emissionen	Bereitstellung Energieträger	Unterhalt Fahrzeug	Strasse	Total
Treibhausgasemissionen (g CO <sub>2</sub> -Äq./Fzkm)	Benzin (2,6 % biogen)		Verbrenner	38.9	142.9	38.9	5.5	17.1	243.3
			Hybrid	44.3	124.2	33.9	5.8	17.5	225.7
			Plug-in (Verbraucher-Strommix <sup>1</sup> )	47.7	96.9	37.6	5.8	17.5	205.5
	Diesel (5,9 % biogen)		Verbrenner	40.4	123.4	26.4	5.7	17.4	213.3
			Hybrid	43.4	101.3	21.7	5.7	17.4	189.5
			Plug-in (Verbraucher-Strommix <sup>1</sup> )	47.7	82.4	29	5.7	17.4	182.2
	Gas		(27,3 % biogen)	40.6	95.8	37.4	5.5	17.1	196.4
	Brennstoffzelle		Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	48.8	0	78.1	5.8	17.5	150.2
			Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	48.8	0	9.7	5.8	17.5	81.8
	Batterie	NCA	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	59.6	0	27	6.2	18	110.8
			Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	59.6	0	2.9	6.2	18	86.7
		NMC	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	59.1	0	27	6.2	18	110.3
			Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	59.1	0	2.9	6.2	18	86.2
		LFP	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	58.2	0	27	6.2	18	109.4
			Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	58.2	0	2.9	6.2	18	85.3

<sup>1</sup> Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %);  
<sup>2</sup> Erneuerbarer Strom (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare)

				Fahrzeug	Direkte Emissionen	Bereitstellung Energieträger	Unterhalt Fahrzeug	Strasse	Total
Kumulierter Energieaufwand (MJ/Fzkm)	Benzin (2,6 % biogen)		Verbrenner	0.5	0	2.6	0.2	0.8	4.1
			Hybrid	0.6	0	2.3	0.2	0.8	3.9
			Plug-in (Verbraucher-Strommix <sup>1</sup> )	0.7	0	2.6	0.2	0.8	4.3
	Diesel (5,9 % biogen)		Verbrenner	0.6	0	2.2	0.2	0.8	3.8
			Hybrid	0.6	0	1.8	0.2	0.8	3.4
			Plug-in (Verbraucher-Strommix <sup>1</sup> )	0.7	0	2.3	0.2	0.8	4.0
	Gas		(27,3 % biogen)	0.5	0	2.1	0.2	0.8	3.6
	Brennstoffzelle		Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	0.7	0	5.7	0.2	0.8	7.4
			Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	0.7	0	2.6	0.2	0.8	4.3
	Batterie	NCA	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	0.8	0	2.0	0.2	0.9	3.9
			Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	0.8	0	0.9	0.2	0.9	2.8
		NMC	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	0.8	0	2.0	0.2	0.9	3.9
			Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	0.8	0	0.9	0.2	0.9	2.8
		LFP	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	0.8	0	2.0	0.2	0.9	3.9
			Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	0.8	0	0.9	0.2	0.9	2.8

<sup>1</sup> Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %);  
<sup>2</sup> Erneuerbarer Strom (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare)



Tabelle 13: Zu Abbildung 6 Einfluss der verschiedenen Antriebssysteme auf die gesamte Umweltbelastung, pro Fahrzeugkilometer eines Mittelklasse Personenwagens (1250-1750 kg, Beispielfahrzeuge siehe Tabelle 2) aufgeteilt auf die verschiedenen Umweltkategorien

			THG	radioaktiver Abfall	Hauptluftschadstoffe & PM	Schwermetalle (Luft)	Energieressourcen	Mineralische Ressourcen	Andere	Gesamt
Benzin (2,6 % biogen)		Verbrenner	243	20	31	16	34	10	88	442
		Hybrid	226	20	30	16	32	14	85	423
		Plug-in (Verbraucher-Strommix <sup>1</sup> )	205	41	31	19	34	15	71	416
Diesel (5,9 % biogen)		Verbrenner	214	20	28	15	30	10	83	400
		Hybrid	190	20	27	15	27	13	78	370
		Plug-in (Verbraucher-Strommix <sup>1</sup> )	182	41	29	18	31	15	69	385
Gas		(27,3 % biogen)	196	24	25	15	29	9	80	378
Brennstoffzelle		Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	150	160	31	21	54	20	84	520
		Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	82	20	24	19	21	20	66	252
Batterieelektrisch	NCA	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	111	70	42	26	29	16	57	351
		Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	87	21	40	25	17	16	52	258
	NMC	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	110	70	33	31	29	17	57	347
		Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	86	21	30	30	17	17	53	254
	LFP	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	109	70	28	28	28	16	61	340
		Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	85	21	25	27	17	16	56	247
<sup>1</sup> Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %); <sup>2</sup> Erneuerbarer Strom (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare)										

Tabelle 14: Zu Abbildung 7 Treibhausgasemissionen (THG), gesamte Umweltbelastung (UBP) und kumulierter Energieaufwand (KEA) als Funktionen der Fahrleistung (Mittelklasse)

UBP als Funktion der Fahrleistung (UBP (Millionen Punkte))										
		0	25000	50000	75000	100000	125000	150000	175000	200000
Benzin		16.3	25.6	34.9	44.2	53.4	62.7	72.0	81.2	90.5
BEV	Verbraucher-Strommix	30.3	35.5	40.7	45.9	51.1	56.3	61.5	66.7	71.9
	Erneuerbarer Strom	30.3	33.2	36.0	38.9	41.8	44.6	47.5	50.4	53.2
FCEV	Verbraucher-Strommix	22.8	33.1	43.5	53.8	64.1	74.4	84.7	95.0	105.3
	Erneuerbarer Strom	31.0	43.4	55.8	68.2	80.6	93.1	105.5	117.9	130.3
Emission von THG als Funktion der Fahrleistung (t CO <sub>2</sub> -Äq)										
		0	25000	50000	75000	100000	125000	150000	175000	200000
Benzin		7.8	13.1	18.5	23.9	29.2	34.6	39.9	45.3	50.7
BEV	Verbraucher Strommix	11.9	13.5	15.0	16.6	18.1	19.6	21.2	22.7	24.3
	Erneuerbarer Strom	11.9	12.8	13.7	14.6	15.5	16.4	17.3	18.2	19.0
FCEV	Verbraucher Strommix	9.8	12.6	15.4	18.2	21.0	23.9	26.7	29.5	32.3
	Erneuerbarer Strom	13.2	16.6	20.0	23.4	26.8	30.2	33.6	37.0	40.4
Kumulierter Energieaufwand als Funktion der Fahrleistung (KEA in GJ)										
		0	25000	50000	75000	100000	125000	150000	175000	200000
Benzin		109.1	200.2	291.3	382.4	473.6	564.7	655.8	747.0	838.1
BEV	Verbraucher Strommix	172.0	242.8	313.5	384.3	455.0	525.8	596.5	667.3	738.0
	Erneuerbarer Strom	172.0	219.5	266.9	314.3	361.7	409.1	456.6	504.0	551.4
FCEV	Verbraucher Strommix	146.9	297.8	448.8	599.7	750.6	901.5	1052.4	1203.4	1354.3
	Erneuerbarer Strom	146.9	231.6	316.3	401.0	485.7	570.4	655.1	739.8	824.5

Tabelle 15: Zu Abbildung 8: Einfluss der Fahrzeuggrösse und des Fahrzeuggewichts bei Personenwagen auf die Emission von Treibhausgasen (g CO<sub>2</sub>-Äq./ Fzkm)

		Fahrzeug	Direkte Emissionen	Bereitstellung Energieträger	Unterhalt Fahrzeug	Strasse	Total
Verbrenner (Benzin)	"Oberklasse SUV" (2120 kg)	60.8	223.4	60.9	8.5	21.3	374.9
	"Oberklasse" (1788 kg)	50.9	192.1	52.3	7.2	19.5	322.0
	"Mittelklasse" (1373 kg)	38.9	142.9	38.9	5.5	17.1	243.3
	"Kompakt" (1180 kg)	33.4	121.2	33.2	4.7	16.0	208.5
Verbrenner (Diesel)	"Oberklasse SUV" (2149 kg)	61.7	202.9	43.4	8.6	21.5	338.1
	"Oberklasse" (1815 kg)	51.7	166.8	35.7	7.3	19.6	281.1
	"Mittelklasse" (1428 kg)	40.4	123.4	26.4	5.7	17.4	213.3
	"Kompakt" (1212 kg)	34.4	100.1	21.8	4.9	16.2	177.4
Plug-In Hybrid (Benzin)	"Oberklasse SUV" (2355 kg, 16 kWh)	76.6	150.8	57.2	9.5	22.7	316.8
	"Oberklasse" (2021 kg, 17 kWh)	66.7	130.5	49.5	8.1	20.8	275.6
	"Mittelklasse" (1438 kg, 10 kWh)	47.7	96.9	37.6	5.8	17.5	205.5
	"Kompakt" (1308 kg, 7 kWh)	43.2	84.0	33.4	5.2	16.7	182.5
BEV	"Oberklasse SUV" (2215 kg, 95 kWh)	100.3	0.0	36.1	8.9	21.8	167.1
	"Oberklasse" (1909 kg, 83 kWh)	85.2	0.0	31.1	7.7	20.3	144.3
	"Mittelklasse" (1538 kg, 52 kWh)	59.6	0.0	27.0	6.2	18.0	110.8
	"Kompakt" (1284 kg, 40 kWh)	49.5	0.0	24.2	5.1	16.6	95.4
	"Mikro" (528 kg, 17 kWh)	71.6	0.0	15.5	2.1	12.3	101.5

Tabelle 16: Zu Abbildung 8: Einfluss der Fahrzeuggrösse und des Fahrzeuggewichts bei Personenwagen auf die gesamte Umweltbelastung (UBP/Fzkm)

		Fahrzeug	Direkte Emissionen	Bereitstellung Energieträger	Unterhalt Fahrzeug	Strasse	Total
Verbrenner (Benzin)	"Oberklasse SUV" (2120 kg)	126.7	284.6	149.8	16.0	69.4	646.5
	"Oberklasse" (1788 kg)	106.5	249.4	128.8	13.5	65.1	563.3
	"Mittelklasse" (1373 kg)	81.5	194.5	95.8	10.3	59.4	441.5
	"Kompakt" (1180 kg)	70.2	154.9	81.6	8.9	56.7	372.3
Verbrenner (Diesel)	"Oberklasse SUV" (2149 kg)	128.9	265.9	118.7	16.3	69.9	599.7
	"Oberklasse" (1815 kg)	108.6	223.4	97.6	13.7	65.3	508.6
	"Mittelklasse" (1428 kg)	85.0	172.5	72.2	10.8	59.9	400.4
	"Kompakt" (1212 kg)	72.6	133.0	59.6	9.2	57.2	331.6
Plug-In Hybrid (Benzin)	"Oberklasse SUV" (2355 kg, 16 kWh)	172.3	182.9	166.1	17.8	72.6	611.7
	"Oberklasse" (2021 kg, 17 kWh)	152.4	160.2	143.7	15.3	68.1	539.7
	"Mittelklasse" (1438 kg, 10 kWh)	110.0	125.3	110.1	10.8	60.2	416.4
	"Kompakt" (1308 kg, 7 kWh)	99.2	113.2	98.9	9.9	58.4	379.6
BEV	"Oberklasse SUV" (2215 kg, 95 kWh)	254.3	18.2	145.7	16.7	70.6	505.5
	"Oberklasse" (1909 kg, 83 kWh)	218.3	17.5	125.6	14.4	66.8	442.6
	"Mittelklasse" (1538 kg, 52 kWh)	151.1	16.6	109.1	11.6	62.9	351.3
	"Kompakt" (1284 kg, 40 kWh)	124.9	16.0	97.7	9.7	58.1	306.4
	"Mikro" (528 kg, 17 kWh)	190.5	14.1	62.6	4.0	47.8	319.0

Tabelle 17: Zu Abbildung 8: Einfluss der Fahrzeuggrösse und des Fahrzeuggewichts bei Personenwagen auf den kumulierten Energieaufwand (KEA, MJ/Fzkm)

		Fahrzeug	Direkte Emissionen	Bereitstellung Energieträger	Unterhalt Fahrzeug	Strasse	Total
Verbrenner (Benzin)	"Oberklasse SUV" (2120 kg)	0.8	0	4.1	0.2	0.9	6.0
	"Oberklasse" (1788 kg)	0.7	0	3.6	0.2	0.9	5.4
	"Mittelklasse" (1373 kg)	0.5	0	2.6	0.2	0.8	4.1
	"Kompakt" (1180 kg)	0.5	0	2.3	0.1	0.8	3.7
Verbrenner (Diesel)	"Oberklasse SUV" (2149 kg)	0.8	0	3.6	0.2	1.0	5.6
	"Oberklasse" (1815 kg)	0.7	0	2.9	0.2	0.9	4.7
	"Mittelklasse" (1428 kg)	0.6	0	2.2	0.2	0.8	3.8
	"Kompakt" (1212 kg)	0.5	0	1.8	0.1	0.8	3.2
Plug-In Hybrid (Benzin)	"Oberklasse SUV" (2355 kg, 16 kWh)	1.1	0	4.0	0.3	1.0	6.4
	"Oberklasse" (2021 kg, 17 kWh)	0.9	0	3.4	0.2	0.9	5.4
	"Mittelklasse" (1438 kg, 10 kWh)	0.7	0	2.6	0.2	0.8	4.3
	"Kompakt" (1308 kg, 7 kWh)	0.6	0	2.3	0.1	0.8	3.8
BEV	"Oberklasse SUV" (2215 kg, 95 kWh)	1.4	0	2.7	0.3	1.0	5.4
	"Oberklasse" (1909 kg, 83 kWh)	1.2	0	2.3	0.2	0.9	4.6
	"Mittelklasse" (1538 kg, 52 kWh)	0.8	0	2.0	0.2	0.9	3.9
	"Kompakt" (1284 kg, 40 kWh)	0.7	0	1.8	0.1	0.8	3.4
	"Mikro" (528 kg, 17 kWh)	1.0	0	1.1	0.1	0.7	2.9

Tabelle 18: Zu Abbildung 9: Treibhausgas-Potenzial pro Person für eine Strecke von 5 km, 30 km und 100 km bei durchschnittlichem Belegungsgrad. Angenommene Belegungsgrade: Fernverkehr Bahn = 33 %, S-Bahn = 26 %, PW = 1.6 Personen, Zweiräder = 1 Person

THG in kg CO <sub>2</sub> -Äq./Person und Strecke								
			Fahrzeug	Direkte Emissionen	Bereitstellung Energieträger	Unterhalt Fhgz.	Strasse	Summe
Kurzstrecke (5 km)	ÖV	Durchschnitt ÖV	0.006	0.018	0.007	0.001	0.029	0.062
		Velo	0.021	0.000	0.000	0.006	0.003	0.030
		Velo elektrisch (<45 km/h)	0.035	0.000	0.009	0.005	0.003	0.052
	Scooter	elektrisch	0.229	0.000	0.037	0.048	0.049	0.363
		Benzin	0.087	0.404	0.102	0.049	0.049	0.691
	PW	Mikro elektrisch, NCA	0.224	0.000	0.048	0.007	0.038	0.317
		Mittelklasse elektrisch NCA	0.186	0.000	0.084	0.019	0.056	0.345
Mittelklasse Benzin		0.122	0.447	0.122	0.017	0.053	0.761	
Mittlere Strecke (30 km)	ÖV	S-Bahn CH	0.045	0.003	0.034	0.037	0.126	0.245
		Durchschnitt ÖV	0.036	0.109	0.043	0.007	0.177	0.372
		Velo elektrisch (<45 km/h)	0.212	0.000	0.053	0.031	0.018	0.314
	Scooter	elektrisch	1.375	0.000	0.222	0.290	0.291	2.178
		Benzin	0.519	2.425	0.610	0.293	0.291	4.138
	PW	Mikro elektrisch, NCA	1.342	0.000	0.291	0.040	0.231	1.904
		Mittelklasse elektrisch NCA	1.117	0.000	0.506	0.116	0.338	2.077
Mittelklasse Benzin		0.729	2.680	0.730	0.103	0.321	4.563	
Längere Strecke (100 km)	ÖV	Fernverkehr Bahn	0.087	0.003	0.065	0.072	0.454	0.682
	PW	Mittelklasse elektrisch NCA	3.725	0.000	1.687	0.385	1.128	6.925
		Mittelklasse Benzin	2.430	8.933	2.434	0.344	1.070	15.211

Tabelle 19: Zu Abbildung 10: Umweltbelastungspunkte pro Person für eine Strecke von 5 km, 30 km und 100 km bei durchschnittlichem Belegungsgrad. Angenommene Belegungsgrade: Fernverkehr Bahn = 33 %, S-Bahn = 26 %, PW = 1.6 Personen, Zweiräder = 1 Person

Umweltbelastung in UBP/Person und Strecke								
			Fahrzeug	Direkte Emissionen	Bereitstellung Energieträger	Unterhalt Fhgz.	Strasse	Summe
Kurzstrecke (5 km)	ÖV	Durchschnitt ÖV	14.4	36.4	25.2	2.4	80.8	159.1
		Velo	43.9	9.3	0.0	10.2	6.0	69.4
		Velo elektrisch (<45 km/h)	86.7	10.7	35.7	9.5	7.1	149.7
	Scooter	elektrisch	563.0	70.0	149.6	77.2	207.8	1067.6
		Benzin	181.4	720.9	250.3	78.8	207.8	1439.2
	PW	Mikro elektrisch, NCA	595.2	44.0	195.6	12.4	149.4	996.6
		Mittelklasse elektrisch NCA	472.2	52.0	340.8	36.2	192.3	1093.5
Mittelklasse Benzin		254.8	607.9	299.4	32.3	185.3	1379.7	
Mittlere Strecke (30 km)	ÖV	S-Bahn CH	103.1	241.4	294.0	70.2	369.0	1077.8
		Durchschnitt ÖV	86.1	218.3	150.9	14.5	484.8	954.7
		Velo elektrisch (<45 km/h)	520.3	64.0	214.0	57.0	42.5	897.8
	Scooter	elektrisch	3377.7	420.1	897.8	463.4	1246.6	6405.6
		Benzin	1088.3	4325.3	1501.9	472.6	1246.6	8634.7
	PW	Mikro elektrisch, NCA	3571.0	263.9	1173.7	74.7	896.4	5979.7
		Mittelklasse elektrisch NCA	2833.5	312.1	2044.8	217.4	1153.6	6561.4
Mittelklasse Benzin		1529.0	3647.4	1796.3	194.0	1111.7	8278.4	
Längere Strecke (100 km)	ÖV	Fernverkehr Bahn	199.9	814.0	559.4	136.3	1333.8	3043.4
	PW	Mittelklasse elektrisch NCA	9445.0	1040.4	6815.9	724.7	3845.4	21871.4
		Mittelklasse Benzin	5096.6	12158.0	5987.5	646.7	3705.7	27594.5

Tabelle 20: Fahrleistung in km, an der das jeweilig Fahrzeug die gleiche Umweltwirkung aufweist wie der mit Benzin betriebene Mittelklasse PW. Oberhalb dieser Fahrleistung ist die Umweltwirkung des mit Benzin betriebenen Mittelklasse PW höher als die des Vergleichsfahrzeugs (Abbildung 7)

	UBP	THG	KEA
Mittelklasse PW Benzin			
Kompakt PW Batterie Verbraucher-Strommix	48201	13492	31956
Mittelklasse PW Batterie Verbraucher-Strommix	85693	27137	77268
Oberklasse PW Batterie Verbraucher-Strommix	200067	63997	314118
Oberklasse SUV Batterie Verbraucher-Strommix	314866	89702	4394861
Mikro Fahrzeug Batterie erneuerbarer Strom	0	0	0
Kompakt PW Batterie erneuerbarer Strom	32915	11750	17924
Mittelklasse PW Batterie erneuerbarer Strom	54441	23169	36027
Oberklasse PW Batterie erneuerbarer Strom	112075	52977	91805
Oberklasse SUV Batterie erneuerbarer Strom	147471	71460	141893
Kompakt PW Brennstoffzelle Verbraucher-Strommix	Nie	17637	Nie
Mittelklasse PW Brennstoffzelle Verbraucher-Strommix	Nie	19564	Nie
Oberklasse PW Brennstoffzelle Verbraucher-Strommix	Nie	69461	Nie
Oberklasse SUV Brennstoffzelle Verbraucher-Strommix	Nie	130120	Nie
Kompakt PW Brennstoffzelle erneuerbarer Strom	27620	11120	65192
Mittelklasse PW Brennstoffzelle erneuerbarer Strom	29028	11306	147225
Oberklasse PW Brennstoffzelle erneuerbarer Strom	114207	52021	Nie
Oberklasse SUV Brennstoffzelle erneuerbarer Strom	151969	66497	Nie

Tabelle 21: Zu Abbildung 11, Abbildung 12

(pro Fzkm)	Hybrid		Plug-in-Hybrid		Brennstoffzelle		Batterieelektrisch	
	g CO <sub>2</sub> -Äq.	UBP	g CO <sub>2</sub> -Äq.	UBP	g CO <sub>2</sub> -Äq.	UBP	g CO <sub>2</sub> -Äq.	UBP
2021	225.7	423	205.5	416	150.2	520	110.8	351
2030 WWB	290.2	641	169.5	436	133.0	376	102.2	293
2030 ZERO B.	241.7	569	142.3	394	118.8	352	88.9	263
2040 WWB	262.7	511	161.8	360	127.1	310	100.1	267
2040 ZERO B.	188.6	416	120.6	308	114.9	292	80.9	224
2050 WWB	219.7	438	143.5	330	119.4	295	95.7	255
2050 ZERO B.	164.9	376	111.5	295	113.6	283	78.0	217

Tabelle 22: zu Abbildung 13, Abbildung 14

	g CO <sub>2</sub> -Äq./Fzkm	UBP/Fzkm
Benzin 2021	243.3	442
Benzin 2050 WWB	273.9	509
Benzin 2050 ZERO Basis	196.4	421
Benzin 2050 100 % Wind	130.3	329
Diesel 2021	213.3	400
Diesel 2050 WWB	222.2	413
Diesel 2050 ZERO Basis	144.9	325
Diesel 2050 100 % Wind	79.1	234
Brennstoffzelle 2021	150.2	520
Brennstoffzelle 2050 WWB	100.2	251
Brennstoffzelle 2050 ZERO Basis	94.4	238
Brennstoffzelle 2050 100 % Wind	71.0	198
Batterieelektrisch 2021	110.8	351
Batterieelektrisch 2050 WWB	77.8	211
Batterieelektrisch 2050 ZERO Basis	63.2	181
Batterieelektrisch 2050 100 % Wind	55.0	157

Tabelle 23: zu Abbildung 15: Einfluss der Stromherkunft für den Anteil der mittels Stroms bereitgestellten Fahrenergie auf die gesamte Umweltbelastung (aufgelöst nach Arten der Umweltwirkung), auf die Treibhausgasemissionen und auf den kumulierten Energieaufwand (Mittelklasse Fahrzeug)

		Vergleich		Strom								
		Verbraucher-Strommix		Gaskraftwerk			Photovoltaik			Windkraft		
		ICE Benzin	batterieelektrisch	Brennstoffzelle	Plug-in-Hybrid Benzin	batterieelektrisch	Brennstoffzelle	Plug-in-Hybrid Benzin	batterieelektrisch	Brennstoffzelle	Plug-in-Hybrid Benzin	batterieelektrisch
UBP (Punkte/Fzkm)	THG	243.4	110.9	461.8	269.5	240.6	140.5	220.1	120.9	105	214.7	107.7
	Radioaktiver Abfall	19.9	70.2	29.6	21.8	22.5	31.6	22.1	23.2	28.9	21.7	22.2
	Hauptluftschadstoffe & PM	31	42.3	41.8	35	52.4	37.1	34.2	50.6	29	33	47.6
	Schwermetalle (Luft)	15.9	26.1	18.3	21	28.7	22.3	21.7	30.2	20.1	21.3	29.3
	Energieressourcen	33.7	28.6	68.5	37.2	35.2	27.5	30.9	19.9	24	30.3	18.6
	Mineralische Ressourcen	9.9	16.4	22.1	17.7	18.9	25.8	18.2	20.2	22.2	17.7	18.9
	Andere	88.2	56.8	59.5	73.7	52	65.5	74.6	54.2	56.4	73.2	50.8
THG	g CO <sub>2</sub> Äq./Fzkm	243.4	110.9	461.8	269.5	240.6	140.5	220.1	120.9	105.0	214.7	107.7
KEA (Mj/Fzkm)	N. erneuerbar, fossil	3.5	1.4	7.4	3.8	3.6	1.7	3	1.5	2.9	1.4	1.3
	N. erneuerbar, Nuklear	0.5	1.8	0.8	0.6	0.6	0.8	0.6	0.6	0.6	0.8	0.6
	Erneuerbar	0.2	0.6	0.3	0.3	0.2	2.5	0.6	1.1	2.5	0.6	1.1



Tabelle 24: Abbildung 16: Einfluss Utility Factor (elektrischer Fahranteil an der gesamten Fahrleistung in Prozent) bei Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Mix CH = Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %)

		Mittelklasse		Plug-In Hybrid							
		ICE Benzin	batterie-elektrisch (Mix CH)	Oberklasse SUV		Oberklasse		Mittelklasse		Kompakt klasse	
				Basis	Nie geladen	Basis	Nie geladen	Basis	Nie geladen	Basis	Nie geladen
UBP (Punkte/Fzkm)	THG	243.4	110.9	316.8	382.2	275.7	331.9	205.5	247.7	182.8	217.8
	Radioaktiver Abfall	19.9	70.2	53.5	24.7	48.3	23.4	41.0	21.1	39.3	20.4
	Hauptluftschadstoffe & PM	31.0	42.3	47.3	52.2	41.7	46.0	30.7	34.1	27.5	30.0
	Schwermetalle (Luft)	15.9	26.1	29.6	30.1	26.4	27.0	19.0	19.5	16.8	16.9
	Energieressourcen	33.7	28.6	50.0	51.3	43.9	45.0	33.8	34.5	30.7	30.7
	Mineralische Ressourcen	9.9	16.4	21.9	21.9	19.6	19.5	15.2	15.4	14.3	14.2
	Andere	88.2	56.8	94.4	111.6	85.5	101.9	72.3	84.9	69.4	79.2
THG	g CO <sub>2</sub> Äq./Fzkm	243.4	110.9	316.8	382.2	275.7	331.9	205.5	247.7	182.8	217.8
KEA (Mj/Fzkm)	Nicht erneuerbar, fossil	3.5	1.4	4.5	5.4	3.9	4.7	2.9	3.5	2.6	3.1
	Nicht erneuerbar, Nuklear	0.5	1.8	1.4	0.6	1.3	0.6	1.1	0.5	1.0	0.5
	Erneuerbar	0.2	0.6	0.6	0.3	0.5	0.3	0.4	0.3	0.4	0.2

Tabelle 25: Abbildung 17: Einfluss der verwendeten Methode zur Wirkungsabschätzung (Mittelklassefahrzeug).

Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %)

Erneuerbarer Strom (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare).

			THG	Hauptluftschadstoffe & PM	Schwermetalle (Luft)	Energieressourcen	Mineralische Ressourcen	radioaktiver Abfall	Andere	Gesamt
UBP	Benzin (2,6 % bio.)	Verbrenner	243	31	16	34	10	20	88	442
		Hybrid	226	30	16	32	14	20	85	423
		Plug-in (Verbraucher-Strommix <sup>1</sup> )	205	31	19	34	15	41	71	416
	Diesel (5,9 % bio.)	Verbrenner	214	28	15	30	10	20	83	400
		Hybrid	190	27	15	27	13	20	78	370
		Plug-in (Verbraucher-Strommix <sup>1</sup> )	182	29	18	31	15	41	69	385
	Gas (27,3 % bio.)		196	25	15	29	9	24	80	378
	Brennstoffzelle	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	150	31	21	54	20	160	84	520
		Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	82	24	19	21	20	20	66	252
	Batterieelektrisch	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	111	42	26	29	16	70	57	351
Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>		87	40	25	17	16	21	52	258	
			THG	menschl. Gesundheit	Ökosystem Qualität	Ressourcen				
Impact	Benzin (2,6 % bio.)	Verbrenner	23.9	17.7	3.8	26.3				71.7
		Hybrid	22.1	17.3	3.6	24.7				67.7
		Plug-in (Verbraucher-Strommix <sup>1</sup> )	20.1	17.5	4.1	26.1				67.8
	Diesel (5,9 % bio.)	Verbrenner	20.8	13.5	3.7	23.4				61.4
		Hybrid	18.5	12.9	3.4	21.2				56
		Plug-in (Verbraucher-Strommix <sup>1</sup> )	17.8	14.3	4	23.9				60
	Gas (27,3 % bio.)		17.8	11.5	3.2	22.8				55.3
	Brennstoffzelle	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	14.4	16.3	4.6	40.1				75.4
		Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>	7.9	12.1	3.8	11				34.8
	Batterieelektrisch	Verbraucher-Strommix <sup>1</sup>	10.6	20.5	4.9	21.7				57.7
Erneuerbarer Strom <sup>2</sup>		8.3	19	4.6	11.4				43.3	
<sup>1</sup> Verbraucher-Strommix 2018 (35 % Wasserkraft, 40 % Kernkraft, 10.7 % neue Erneuerbare 14.3 % andere. Importe insgesamt 45 %); <sup>2</sup> Erneuerbarer Strom (96 % Wasserkraft, 4 % andere Erneuerbare)										

Tabelle 26: Zu Abbildung 18 und Abbildung 19

	g CO <sub>2</sub> -Äq./Fzkm	UBP/Fzkm
BEV 2021	110.805	351
BEV 2021, Strommix 2030	102.150	293
BEV 2030, Strommix 2030	91.182	266
+ Recycling	88.960	263
+ Fahrleistung (+50 %)	71.993	220
+ Second Life (+50 %)	68.054	206
BEV 2030, Strommix 2040	89.400	252
BEV 2040, Strommix 2040	82.996	229
+ Recycling	80.854	224
+ Fahrleistung (+50 %)	65.432	187
+ Second Life (+50 %)	62.887	177
BEV 2040, Strommix 2050	82.000	225
BEV 2050, Strommix 2050	79.753	220
+ Recycling	78.008	217
+ Fahrleistung (+50 %)	63.158	181
+ Second Life (+50 %)	60.868	173
+ 100 % Windstrom	55.005	157

Tabelle 27: Zu Abbildung 20

	2021	2050 WWB	+ el. Mix ZERO-Basis	+ Recycling ZERO-Basis	+ 100% Recycling
Wasserverbrauch	0.48132223	0.48132223	0.466250234	0.45937055	0.44677159
Wasserentnahme	0	0	0	0	0
Energie-Ressourcen	1.47175547	1.47175547	1.191331549	1.08165762	0.86533694
mineralische Primärres- sourcen	1.57842993	1.57842993	1.585590326	1.49481077	1.30640617
Landnutzung	0.1637824	0.1637824	0.156735217	0.1332679	0.10308945
Klimawandel	10.7440933	10.7440933	8.052123884	7.19581489	5.41645702
Ozonschichtabbau	0.01301525	0.01301525	0.012133629	0.01088108	0.00799882
Hauptschadstoffe und Partikel	9.15621682	9.15621682	8.562442792	7.24274772	4.01488561
Krebserregende Stoffe in Luft	1.10059214	1.10059214	1.067813579	1.05457352	1.02684501
Schwermetalle in Luft	13.6751272	13.6751272	13.54583775	13.3836362	12.8787739
Wasserschadstoffe	1.56326564	1.56326564	1.552848824	1.45747534	1.3796522
POP ins Wasser	0.09432674	0.09432674	0.081561525	0.06894636	0.04174757
Schwermetalle ins Wasser	0.15652781	0.15652781	0.118522256	0.11190828	0.0989472
Pestizide in den Boden	0.01206836	0.01206836	0.003339016	0.00262599	0.00143333
Schwermetalle in den Boden	0.27303593	0.27303593	0.143976449	0.12377653	0.09710206
Radioaktive Substan- zen in die Luft	2.7226E-05	2.7226E-05	1.89882E-05	1.6031E-05	1.1E-05
Radioaktive Substan- zen ins Wasser	0.05415499	0.05415499	0.042218769	0.0355137	0.02416946
Lärm	0.09859887	0.09859887	0.093936338	0.07474144	0.03808671
Abfälle, nicht radioaktiv	0.36205239	0.36205239	0.37370633	0.36019533	0.32483822
Radioaktive Abfälle in Endlager	1.03233798	1.03233798	0.728824202	0.61511048	0.42250962
Biotische Ressourcen	0	0	0	0	0

### 7.3 Zukünftige Strommixe

Tabelle 28: Electricity consumption mix for Switzerland, following the EP 2050+ Business-As-Usual scenario (PJ) (Sacchi R. B., 2022)

Supply by installation type, in PJ	2030	2040	2050	Dataset in UVEK:2018
Hydropower	145	141	140	
Run-of-river	64	62	58	electricity, hydropower, at run-of-river power plant/kWh/CH U
Reservoir	81	80	82	electricity, hydropower, net, at reservoir power plant/kWh/CH U
Nuclear	32	0	0	electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor/kWh/CH U electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor/kWh/CH U
Conventional thermal power	9	11	13	
Waste-to-energy plant	7	7	7	Electricity from waste, at municipal waste incineration plant/CH U
Other	2	4	5	Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U
Renewables	28	33	44	
Photovoltaics	24	30	40	electricity, production mix photovoltaic, at plant/kWh/CH U
Wind turbines	1	1	1	Electricity, at wind power plant/CH U
Geothermal	0	0	1	
Biomass	1	1	1	Electricity, at cogen 6400kWth, wood, allocation exergy/CH U
Biogas	1	1	1	electricity, at cogen with biogas engine, methane 96 %-vol allocation exergy/CH U
Sum	215	186	197	
Import	20	20	21	electricity, european attribute mix, XXX, BAU, at plant/kWh/RER

Tabelle 29: Electricity consumption mix for Switzerland, following the EP 2050+ ZERO Basis scenario (PJ)

Supply by installation type, in PJ	2030	2040	2050	Dataset in UVEK:2018
Hydropower	150	158	161	
Run-of-river	66	67	67	electricity, hydropower, at run-of-river power plant/kWh/CH U
Reservoir	84	91	94	electricity, hydropower, net, at reservoir power plant/kWh/CH U
Nuclear	32	0	0	electricity, nuclear, at power plant pressure water reactor/kWh/CH U electricity, nuclear, at power plant boiling water reactor/kWh/CH U
Conventional thermal power	8	9	10	
Waste-to-energy plant	7	7	6	Electricity from waste, at municipal waste incineration plant/CH U
Other	3	4	3	Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U
Renewables	36	89	146	
Photovoltaics	31	77	121	electricity, production mix photovoltaic, at plant/kWh/CH U
Wind turbines	2	8	16	Electricity, at wind power plant/CH U
Geothermal	0	2	7	
Biomass	1	1	1	Electricity, at cogen 6400kWth, wood, allocation exergy/CH U
Biogas	1	1	1	electricity, at cogen with biogas engine, methane 96 %-vol allocation exergy/CH U
Sum	227	257	316	
Import	10	5	0	electricity, european attribute mix, XXX, ZERO Basis, at plant/kWh/RER

Tabelle 30: Electricity production mix for neighbouring countries, following the EP 2050+ Business-As-Usual scenario (PJ) (Sacchi R. B., 2022)

Supply by installation type, in PJ	2030	2040	2050	Datasets in UVEK:2018
Nuclear	1158	294	33	Electricity, nuclear, at power plant/UCTE U
Coal	372	0	0	Electricity, hard coal, at power plant/UCTE U
Natural gas	1010	1676	1243	Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U
Other	219	207	240	Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U
Biomass	243	203	160	Electricity, at cogen 6400kWth, wood, allocation exergy/CH U
Onshore wind	896	1074	1458	Electricity, at wind power plant 800kW/RER U
Offshore wind	298	396	693	Electricity, at wind power plant 2MW, offshore/OCE U
Photovoltaics	592	937	1290	electricity, production mix photovoltaic, at plant/kWh/DE U
Hydro	674	691	731	electricity, hydropower, at reservoir power plant, alpine region/kWh/RER U electricity, hydropower, at reservoir power plant, non alpine regions/kWh/RER U electricity, hydropower, at run-of-river power plant/kWh/RER U

Tabelle 31: Electricity production mix for neighbouring countries, following the EP 2050+ ZERO Basis scenario (PJ) (Sacchi R. B., 2022)

Supply by installation type, in PJ	2030	2040	2050	Datasets in UVEK:2018
Nuclear	291	57	5	Electricity, nuclear, at power plant/UCTE U
Coal	69	0	0	Electricity, hard coal, at power plant/UCTE U
Natural gas	198	225	155	Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U
Other	56	64	69	Electricity, natural gas, at power plant/UCTE U
Biomass	66	47	31	Electricity, at cogen 6400kWth, wood, allocation exergy/CH U
Onshore wind	299	466	590	Electricity, at wind power plant 800kW/RER U
Offshore wind	166	343	499	Electricity, at wind power plant 2MW, offshore/OCE U
Photovoltaics	273	528	817	electricity, production mix photovoltaic, at plant/kWh/DE U
Hydro	189	192	198	electricity, hydropower, at reservoir power plant, alpine region/kWh/RER U electricity, hydropower, at reservoir power plant, non alpine regions/kWh/RER U electricity, hydropower, at run-of-river power plant/kWh/RER U

#### 7.4 Allokation der Umweltbelastung bei der Herstellung von synthetischen Treibstoffen

Tabelle 32: Allocation of Fischer-Tropsch syncrude production process between fuel products. The green shaded row represents the synthetic diesel product flow (Sacchi R. B., 2022, S. 15)

Energy-based allocation	LHV (MJ/kg)	Energy produced (GJ)	Energy produced (%)	Mass (kg)	Mass syn-gas, allocated (kg)	Mass syn-gas, allocated (kg/kg)	Embedded CO <sub>2</sub> from syn-gas (kg/kg)	CO <sub>2</sub> content (kg/kg)	Carbon correction (kg/kg)
Syngas	23.94	980'752	100%	40'967'084			1.37		
Naphtha	44.5	190'189	24 %	4'273'910	9'930'511	2.32	3.19	3.37	0.18
Kerosene	45	143'100	18 %	3'180'000	7'471'810	2.35	3.23	3.14	-0.09
Diesel	43.3	286'404	37 %	6'614'411	14'954'272	2.26	3.11	3.16	0.05
Lubricating oil	40.2	164'908	21 %	4'102'189	8'610'491	2.10	2.88	2.75	-0.13
Loss		196'151							

Tabelle 33: Allocation of synthetic methanol production process between fuel products. The green shaded row represents the synthetic gasoline product flow (Sacchi R. B., 2022, S. 15)

Energy-based allocation	LHV (MJ/kg)	Mass (kg)	Energy produced (MJ)	Energy produced (%)	Mass methanol, allocated (kg/kg fuel)	CO <sub>2</sub> captured from methanol (kg/kg)	CO <sub>2</sub> content of fuel (kg CO <sub>2</sub> /kg)	Carbon correction (kg/kg)
Methanol	19	2.42				1.37		
Diesel	44	0.183	8.05	19 %	2.449	-3.36	3.16	-0.20
LPG	45.5	0.086	3.91	9 %	2.533	-3.47	3.01	-0.46
Gasoline	43.4	0.466	20.22	47 %	2.416	-3.31	3.14	-0.17
Kerosene	42.6	0.265	11.29	26 %	2.371	-3.25	3.14	-0.11