



Abschlussbericht

«Strategie zur Dekarbonisierung der Nutzfahrzeugflotte im Unterhalt der Nationalstrassen»

2023

Ostschweizer Fachhochschule

Impressum

Autoren:	Imre Antalffy	OST-IET
Autoren:	Marius Kaltenbach	OST-IET
Autoren:	Markus Friedl	OST-IET
Autoren:	Fabian Leuthold	OST-IMS
Autoren:	Christoph Strauss	OST-IMS
Autoren:	Daniel Kliem	OST-IMS

Projektpartner:	Philipp Rüttimann	GE-VI
Projektpartner	Adrian Meier	GE-VI
Auftraggeber	Pablo Julia	ASTRA

Projektleitung: Daniel Kliem
Kontakt daniel.kliem@ost.ch
Erstellt am: 20. Juli 2023
Überarbeitet am: 17. Oktober 2023

«Strategie zur Dekarbonisierung der Nutzfahrzeugflotte im Unterhalt der Nationalstrassen»

Dieser Bericht präsentiert die wichtigsten Erkenntnisse des Projekts "Strategie zur Dekarbonisierung der Nutzfahrzeugflotte im Unterhalt der Nationalstrassen" und zielt darauf ab, gemäss der Weisung zur Umsetzung der Energiestrategie 2050 im betrieblichen Unterhalt des Bundesamtes für Strassen (ASTRA) eine Flottendekarbonisierungsstrategie für die Beschaffung von Fahrzeugen und Geräten zu entwickeln. Es wird darauf hingewiesen, dass vorerst Änderungen bei der Strombeschaffung der Werkhöfe ausgeklammert werden. Das Projekt strebt an, eine Grundlage für eine höhere Planungssicherheit für die Fahrzeug- und Gerätebeschaffung zu ermöglichen.

Basierend auf den Erkenntnissen der Marktstudie wird erwartet, dass batterieelektrische Fahrzeuge die dominierende Technologie in der Fahrzeugindustrie werden. Diese Entwicklung wird einerseits begünstigt durch Vorschriften zur Verringerung der CO₂-Emissionen und finanzielle Anreize für den Kauf von Elektroautos, andererseits durch ein wachsendes Angebot seitens der Hersteller. Das EU-Parlament hat zudem beschlossen, ab 2035 keine Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren mehr zuzulassen. Daher wird erwartet, dass batterieelektrische Fahrzeuge vor allem im Stadt- und Regionalverkehr eingesetzt werden und die Hersteller ihr Produktportfolio in Richtung batterieelektrische Fahrzeuge erweitern.

Im Gegensatz zu batterieelektrischen und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen sind bereits eine grosse Anzahl von Fahrzeugen auf dem Markt verfügbar, die mit biogenen Kraftstoffen betrieben werden können, da hierfür keine neuen Technologien erforderlich sind. Biogene Kraftstoffe gelten ebenfalls als nachhaltige Alternative zu fossilen Brennstoffen, da sie die CO₂-Emissionen im Verkehr um bis zu 85 % reduzieren können. Die kritische Betrachtung bei biogenen Treibstoffen liegt jedoch in der Herstellung und Verfügbarkeit des Kraftstoffs selbst. Da eine vollständige Substitution fossiler Treibstoffe durch biogene oder synthetische Treibstoffe in Bezug auf die Produktionskapazitäten nicht möglich ist, könnte allenfalls eine Reduktion der CO₂-Emissionen durch Beimischung in einem Übergangszeitraum denkbar sein.

Bei Nutzfahrzeugen spielen vor allem wirtschaftliche Gründe eine Rolle bei der Kaufentscheidung. Es wird erwartet, dass die Gesamtbetriebskosten für Elektro-Lkw in wenigen Jahren in vielen Bereichen niedriger sein werden als für Diesel-Lkw. Auch die grossen Hersteller der Branche erweitern ihr Produktportfolio in Richtung batterieelektrische Fahrzeuge. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass noch technische Entwicklungsdefizite vorhanden sind, wie beispielsweise die begrenzte Verfügbarkeit von Hochleistungsladestationen und das fehlende Systemwissen, um die Ladeinfrastruktur netzfreundlich in das Energiesystem zu integrieren. Darüber hinaus werden Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge im täglichen Einsatz erprobt und es gibt einige wenige Hersteller mit Kleinserien auf dem Markt. Es bestehen jedoch Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff für den Mobilitätssektor sowie dem Ausbau der Tankstelleninfrastruktur. Insgesamt lässt sich festhalten, dass batterieelektrische Antriebe das grösste CO₂-Einsparpotenzial bieten und die geringsten Hürden für die Umsetzung aufweisen. Die Verfügbarkeit von grünem Strom und einer angemessenen Netzinfrastruktur sind jedoch Voraussetzungen dafür. Abschliessend kann festgestellt werden, dass batterieelektrische Fahrzeuge aufgrund ihrer Umweltvorteile und der steigenden Marktdurchdringung als vielversprechende Lösung zur Dekarbonisierung der Nutzfahrzeugflotte betrachtet werden. Es wird empfohlen, die technologischen Entwicklungen und Fortschritte aufmerksam zu verfolgen und die Strategie entsprechend anzupassen, um die gesteckten Ziele zu erreichen.

Inhalt

1. Marktlage.....	4
1.1 Batterieelektrische Fahrzeuge.....	4
1.2 Brennstoffzellenfahrzeuge	5
1.3 Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor betrieben mit biogenen Kraftstoffen.....	6
1.4 Eigene Biogasproduktion	8
1.5 Zusammenfassung der Marktsituation.....	8
2. Analyse Fuhrpark.....	11
2.1 Vertiefte Betrachtung Fahrzeugkategorien	12
2.1.1 Personenkraftwagen	12
2.1.2 Kleintransporter, Busse	13
2.1.3 3-Achs Lkw	13
2.1.4 Spezialfahrzeuge (Geräteträger)	16
3. PV-Potentialbetrachtung Ge-VI Standorte	16
4. Risikobetrachtung Einsatz BEV.....	19
4.1 Betriebliche Risiken	19
4.1.1 Erkenntnisse aus dem Experteninterview mit Martin Wyss:	19
4.1.2 Einschätzung der betrieblichen Nutzung von H2 in der Mobilität in den nächsten 10 Jahren: ...	20
4.1.3 Versorgungssicherheit in Bezug auf Netzstabilität:	20
4.2 Elektromobilität und Tunnelsicherheit.....	21
4.3 Versorgungsengpässe bei Strommangellagen	23
5. Klimawirksamkeit der Flottenerneuerung.....	25
5.1 Weisung und Vergleichsbasis	25
5.2 Flottenmodellierung	27
5.3 Betrachtung alternativer Flottenersatzszenarien.....	30
6. Zusammenfassung	33
ANHANG	34
7. Literatur	46

1. Marktlage

Es gibt derzeit vier marktreife Antriebstechnologien, welche eine Alternative zum konventionellen Verbrennungsmotor darstellen. Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) werden direkt mit Strom geladen, während Brennstoffzellen (FCEV) Strom aus Wasserstoff erzeugen und damit einen Elektromotor betreiben. Bestehende Verbrenner können mit Biomethan (Bio-CNG) oder synthetischen Kraftstoffen betrieben werden.

1.1 Batterieelektrische Fahrzeuge

Nach heutiger Einschätzung wird voraussichtlich der batterieelektrische Antrieb bei den Personenwagen in Zukunft die Rolle als vorherrschende Antriebstechnologie übernehmen. Dies wird durch die seit 2012 in der Schweiz geltenden Vorschriften zur Reduzierung von CO₂-Emissionen und finanzielle Unterstützung beim Kauf von Elektroautos gefördert. Tatsächlich ist der Anteil von batterieelektrischen Pkw bei Neuzulassungen seit 2012 von 0,28 % auf fast 18 % (absolut: 40507) im Jahr 2022 gestiegen. (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2022)

Im Vergleich hierzu liegen FCEV-Neuzulassungen im Jahr 2022 bei absolut 8. (Auto CH, 2023)

Unterstrichen wird diese Einschätzung von der Entscheidung des EU-Parlaments vom 14. Februar 2023. In dieser wurde beschlossen, dass ab 2035 keine Fahrzeuge (Pkw und leichte Nutzfahrzeuge) mit Verbrennungsmotor mehr zugelassen werden dürfen. (EU Parlament, 2023) Eine Überprüfung zur Nutzung von synthetischen Kraftstoffen steht allerdings bis 2026 aus. Mit diesem aktuellen Beschluss und der Verordnung der EU zu CO₂-Flottenzielwerten für schwere Nutzfahrzeuge im Jahr 2019 sowie den ab dem Jahr 2025 wirksamen Flottenzielwerten ist im Bereich der Lkw eine ähnliche Dynamik zu erwarten. (Europäische Kommission, 14. Juli 2021) Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft batterieelektrische Nutzfahrzeuge vorrangig für den städtischen und regionalen Verkehr eingesetzt werden, so die Erwartungen innerhalb der Branche. (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, 2020)

Die Entscheidung für den Kauf von Nutzfahrzeugen erfolgt hauptsächlich aus wirtschaftlichen Gründen und weniger auf emotionaler Basis. Verschiedene Studien, wie zum Beispiel von Agora Verkehrswende, dem International Transport Forum ITF oder Strategy&/PWC, zeigen, dass die Gesamtkosten pro Kilometer (auch bekannt als "Total Cost of Ownership" oder kurz TCO) für elektrische Lastkraftwagen (E-Lkw) in vielen Anwendungsbereichen bereits in wenigen Jahren niedriger sein werden als diejenigen für Diesel-Lkw. (BFE-Magazin energieplus, 2023)

Auch im Nicht Pkw-Bereich ist die Anzahl der am Markt verfügbaren BEV stetig steigend. Aktuell sind 27 E-Transporter, 27 E-Lkw und 16 E-Sonderfahrzeuge kommerziell erhältlich. Diese sind in ANHANG mit den wichtigsten Leistungsparametern in einer Tabelle zur Übersicht zusammengefasst. (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2023a)

Nach einem Besuch der Baumaschinenausstellung (BAUMA) im Jahr 2022 in München lässt sich zudem auf subjektiver Ebene festhalten, dass alle namhaften Hersteller der Branche ihr Produktportfolio zum momentanen Zeitpunkt in Richtung BEV ausbauen. So hat sich z.B. Scania das Ziel gesetzt, bis 2030 den Anteil der verkauften elektrischen Lastwagen auf 50% zu erhöhen, während Volvo bis 2030 beabsichtigt, den Anteil seiner verkauften elektrischen Lastwagen auf 35% zu steigern.

Die rasante Entwicklung der Fahrzeuge hat dazu geführt, dass es heute Defizite in der technischen Entwicklung gibt, wie zum Beispiel die begrenzte Verfügbarkeit von Ladestationen im Megawatt-Bereich. Es besteht zudem zum heutigen Stand auch ein Mangel an systemischem Wissen, um die Ladeinfrastruktur in das Energiesystem netzdienlich zu integrieren. (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2022)

1.2 Brennstoffzellenfahrzeuge

Die Entwickler von Nutzfahrzeugen arbeiten momentan an verschiedenen emissionsfreien Antriebsoptionen für den Güterfernverkehr. Die Politik unterstützt diese Bemühungen, ohne sich auf eine bestimmte Technologie festzulegen. Abgesehen von batterieelektrischen Antriebssystemen werden auch Brennstoffzellen-Lkws in der praktischen Erprobungsphase getestet. (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2020)

Es ist hierbei festzuhalten, dass die Entwicklung dieser Antriebstechnologie im Gegensatz zum batterieelektrischen Antrieb nicht so klar definiert ist. Die Unsicherheit betrifft insbesondere die Wasserstoffspeichertechnologie, da die Hersteller unterschiedliche Pläne haben, den Wasserstoff an Bord der Nutzfahrzeuge zu speichern - entweder mit 350 bar, 700 bar oder flüssig (LH₂). Einige Hersteller möchten genug Wasserstoff im Lkw mitführen, um eine ähnliche Reichweite (ca. 1000 km) wie konventionelle Diesel-Sattelzugmaschinen zu erreichen. Andere Hersteller betrachten nicht die hohen Reichweiten als notwendig und möchten die Brennstoffzelle auch während der gesetzlich vorgeschriebenen Ruhezeiten zu betanken, um mit geringerer Energiemenge im Fernverkehr eingesetzt zu werden. Es herrscht jedoch Einigkeit unter den Herstellern, dass die Brennstoffzelle in schweren Nutzfahrzeugen ab 26 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht eingesetzt werden soll. (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2023b)

Anteile Neuzulassungen alternative Antriebe

Liefer- und Lastwagen 2018-2022

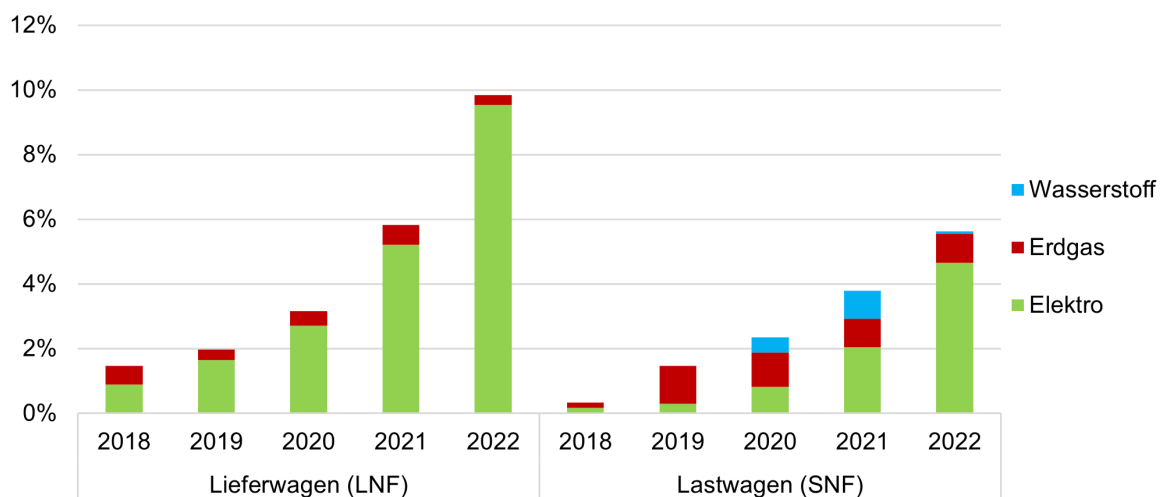


Abbildung 1 Anteile Neuzulassungen alternative Antriebe in CH von Liefer- und Lastwagen 2018-2022 (BFE-Magazin energieplus, 2023)

In Abbildung 1 ist ersichtlich, dass die Zulassungen von H₂-Lkw in der Schweiz in den Jahren 2020 und 2021 einen Anstieg verzeichnen konnten. Diese Trendentwicklung setzte sich im Jahr 2022 allerdings nicht fort. Es ist davon auszugehen, dass dies eine Konsequenz der angestiegenen Strompreise ist und zu einer Verknappung von grünem Wasserstoff führte.

Für den Betrieb von Brennstoffzellen-Lkw ist eine grundlegende Voraussetzung die Existenz von Wasserstofftankstellen. Die Hersteller haben unterschiedliche Ansichten darüber, wann und wie gross ein Netz von Wasserstofftankstellen aufgebaut werden sollte. Es besteht jedoch Einigkeit darüber, dass der Aufbau zeitnah beschleunigt werden sollte. Es ist wichtig, ein Grundnetz bereitzustellen, um das Henne-Ei-Problem zu umgehen und den Kunden der Nutzfahrzeughersteller eine Betankungsinfrastruktur zur Verfügung zu stellen. (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2023b)

Zum aktuellen Zeitpunkt sind nur wenige Fahrzeuge kommerziell verfügbar. Es gibt insg. 6 H2-Transporter, 5 H2-Lkw und 2 H2-Sonderfahrzeuge. Diese werden in im Anhang zur Übersicht mit den wichtigsten Leistungsparametern zusammengefasst. (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2023a)

Es ist jedoch anzumerken, dass unter anderem Volvo ein Joint Venture mit Daimler Trucks hat. Ab 2025 sollen erste Brennstoffzellen-Fahrzeuge für lange Strecken und schwere Lasten aus dieser Zusammenarbeit auf den Markt kommen. (BFE-Magazin energieplus, 2023)

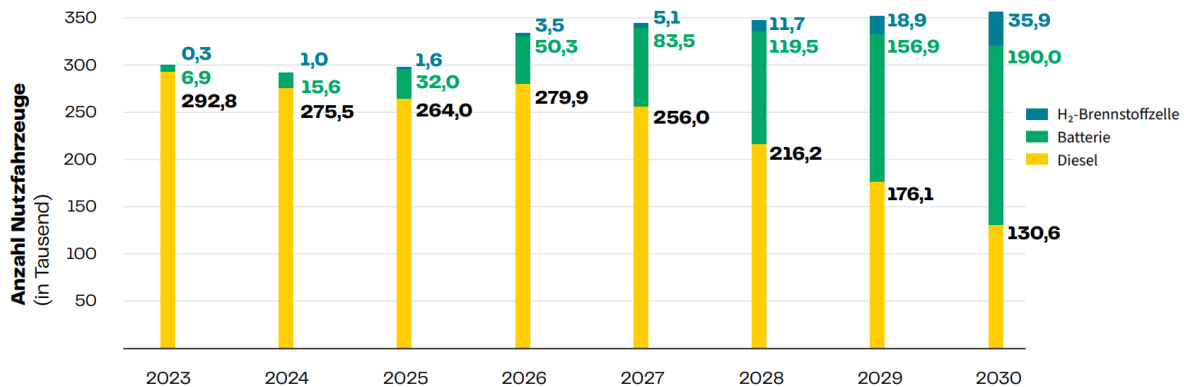


Abbildung 2: Prognostizierte Absatzzahlen schwerer Nutzfahrzeuge (N3/> 12t) in Europa laut Herstellerangaben (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2023b)

Um ab 2030 die europäischen CO₂-Flottenzielwerte zu erreichen, die eine Verringerung um mindestens 30% gegenüber 2019/20 vorsehen, sind klimafreundliche Nutzfahrzeuge entscheidend. Ein Grossteil der hierfür befragten Hersteller setzt auf eine Ein-Säulen-Strategie und somit vollständig auf den Batterie-Lkw. Bei Herstellern, die eine Zwei-Säulen-Strategie bevorzugen, wird der Brennstoffzellen-Lkw bis 2030 jedoch eine zunehmend wichtige Rolle spielen. Es ist unklar, wie die Verteilung zwischen Batterie- und Brennstoffzellen-Lkw bei diesen Herstellern im Jahr 2030 aussehen wird. Dies hängt von vorhandenen Infrastrukturen, Energiepreisen und technischen Entwicklungen ab. (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2023b)

1.3 Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor betrieben mit biogenen Kraftstoffen

Biogene Kraftstoffe sind eine weitere Möglichkeit, um CO₂ Emissionen im Betrieb von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor zu reduzieren. Im dem aktuellen europäischen Massnahmenpaket «Fit for 55» werden folgende Prozessketten mit Bezug zur Kraftstoffherstellung identifiziert:

- ⇒ Die alkoholische Fermentation von zucker- und stärkehaltigen Biomassen zu Bioethanol und
- ⇒ Die anaerobe Fermentation (Vergärung) von Anbaubiomassen, Abfall- und Reststoffen sowie tierischen Exkrementen zu Biomethan. (Deutsches Biomasseforschungszentrum, 2022)

Im Vergleich zu den fossilen Kraftstoffen spart Bioethanol bis zu 40% und Biogas bis zu 85% der Treibhausgase ein. Dadurch ist eine deutliche Emissionsminderung möglich, wenn erneuerbare Rein- oder Mischkraftstoffe mit hohen erneuerbaren Anteilen in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor eingesetzt werden. Bioethanol kann bestehenden Verbrennungsmotoren beigemischt werden. Beispiele dazu sind E7 bis E85, ein Bioethanol-Benzin Gemisch, welchem 7-85% Biodiesel beigemischt wird. (Umweltbundesamt, 2012)

- Biomethan ist identisch zu Erdgas. Das Erdgasnetz kann zum Transport und Speicherung genutzt werden, während CNG/LNG Fahrzeuge direkt betankbar sind
- Zusätzlich zum hohen Einsparpotential kann bestehende Infrastruktur genutzt werden.

(Deutsches Biomasseforschungszentrum, 2022)

Da für diese Kraftstoffe keine neuen Technologien zur Anwendung notwendig sind, sind im Gegensatz zu BEV und FCEV, eine Vielzahl an Fahrzeugen am Markt verfügbar. Die kritische Betrachtung bei den biogenen Treibstoffen ist nicht hinsichtlich der Marktverfügbarkeit der Fahrzeuge, sondern in Bezug auf die Herstellung und Verfügbarkeit des Kraftstoffes selbst notwendig.

Der europäische Verkehr benötigte 2020 ca. 2712 TWh Energie, wovon 6.8 % mit erneuerbaren abgedeckt wurden. Biodiesel (FAME & HVO) machen mit 152 TWh den grössten Teil aus, während 30 TWh von Bioethanol abgedeckt werden. Der Anteil an Biomethan ist mit 2 TWh gering. Diese Anteile sind in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen, spielen aber eine untergeordnete Rolle. (Deutsches Biomasseforschungszentrum, 2022)

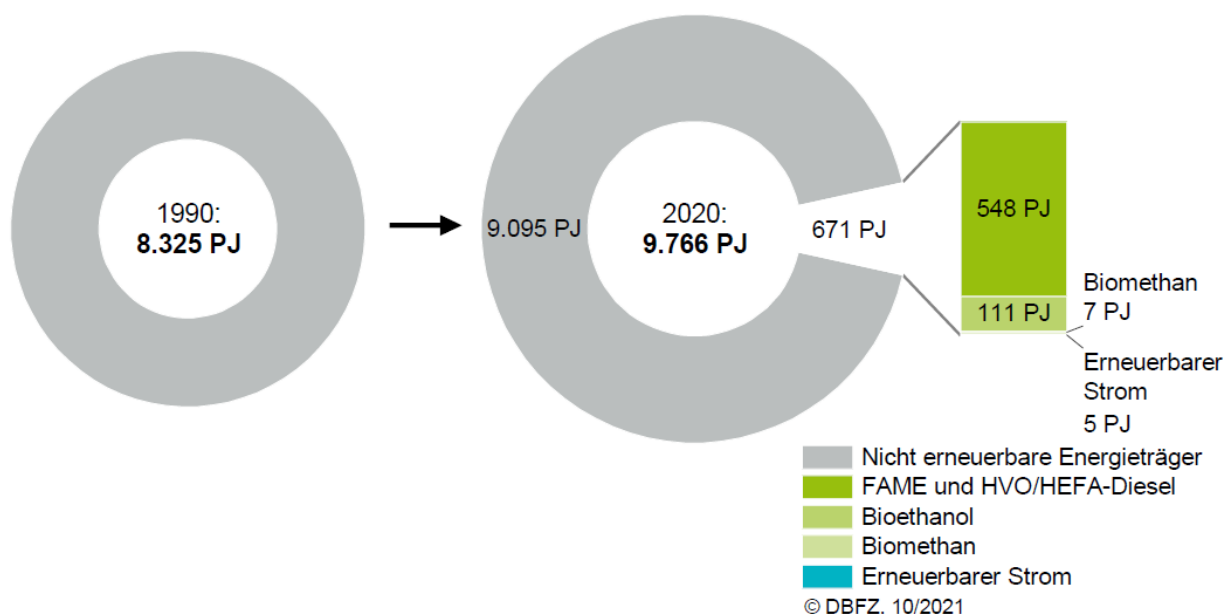


Abbildung 3: Nutzung von Energieträgern im Strassenverkehr (Deutsches Biomasseforschungszentrum, 2022)

Bei der Produktion von Bioethanol spielen bisher nahezu ausschliesslich Hauptprodukte aus der Landwirtschaft eine Rolle, wobei bereits deutliche Bestrebungen erkennbar sind, die Rohstoffpalette auf lignocellulosebasierte Nebenprodukte wie beispielsweise Stroh zu erweitern. Auch bei Biodiesel kommen meist Hauptprodukte wie Raps-, Soja- oder Palmöl zum Einsatz, neben denen bereits 20 % der Ressourcen auf Altpeisefette (UCO) sowie zunehmend auch weitere alternative Ressourcen wie Tallöl oder Reststoffe der Palmölproduktion entfällt. Damit konkurrieren die verschiedenen Kraftstoffe um die gleichen Rohstoffe, was den Druck auf einzelne Verfahren erhöht. Bei Biomethan kommen vor allem Abfallstoffe zum Einsatz, wobei je nach Einsatzgebiet auch Energiepflanzen wie z.B. Mais eingesetzt wird. (Deutsches Biomasseforschungszentrum, 2022)

Dies stellt die schweizerische Produktion vor ein ethisches Problem. Gemäss dem CO₂ Gesetz nach 2020 gilt der Grundsatz "Teller - Trog - Tank". Alles, was noch als Futtermittel verwendet werden kann, darf nicht in den Tank gelangen. Damit dürfen für die Produktion von Biodiesel, Ethanol und Methan nur Abfallstoffe verwendet werden. (Bundesamt für Umwelt, 2018) Abfallstoffe sind in ihrer Zusammensetzung oft divers

und variieren in ihrem Ertrag. Diese Vielfältigkeit der Abfallstoffe stellt die Politik vor Herausforderungen. Klare Regelungen sind den Kantonen überlassen, was zu uneinheitlichen Produktionsprozessen führt. Auch monetäre Anreize fehlen. Lkws, welche mit Biomethan betrieben werden, zahlen die gleichen leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgaben (LSVA) wie fossil betriebene Lkws. Daher ergibt sich für einen Betreiber kein Kostenvorteil. (BFE-Magazin energieplus, 2023)

Perspektivisch sind zahlreiche erneuerbare Energieträger für die Nutzung im Verkehrssektor geeignet und erforderlich, jedoch sind ihre jeweiligen Potenziale begrenzt. Ihre Verwendung als Kraftstoff konkurriert sowohl mit einer potenziellen Nutzung in anderen Sektoren (z. B. Strom- und Wärmebereitstellung oder stoffliche Nutzung wie in der Chemieindustrie), als auch innerhalb des Verkehrssektors zwischen den verschiedenen Verkehrsträgern Strasse, Schiene, Wasser, Luft und landgebundenen Non-Road-Verkehrsträgern. Selbst die notwendigen Ressourcen stehen bereits in einer vielfältigen Nutzungskonkurrenz. Eine hinsichtlich Bereitstellung und Nutzung optimierte Verteilung dieser Potenziale auf die Verkehrsträger ist daher die zentrale Herausforderung für Strategien zu Umstellung von Flotten. Auch aus dem Blickwinkel der biogenen Kraftstoffe steht fest, dass eine weitgehende Elektrifizierung des Verkehrs als zentraler Baustein für eine Klimaneutralität des Sektors unerlässlich ist. Dies betrifft insbesondere den motorisierten Individualverkehr und in grossen Teilen den strassengebundenen Güterverkehr. Andere Verkehrsbereiche wie Schifffahrt und Luftfahrt, der schwere überregionale Güterverkehr, aber auch die 2045 noch vorhandene Bestandsflotte an Pkw und Lkw mit Verbrennungsmotor, werden weiterhin von flüssigen oder gasförmigen Energieträgern abhängig sein. Diese Energieträger gilt es, erneuerbar, klimaneutral und möglichst kompatibel mit dem Bestand bereitzustellen. Neben der Elektrifizierung wäre eine Beimischung von Biokraftstoffen zu untersuchen, um den Übergang der Lkw-Flotte so emissionsneutral wie möglich zu gestalten. (Deutsches Biomasseforschungszentrum, 2022)

1.4 Eigene Biogasproduktion

Eine diskutierte Möglichkeit wäre der Bau und Betrieb einer eigenen Biogasanlage auf dem GE-VI Werkhof. Mit einer Aufreinigung (Abtrennung von Reaktionsprodukten) könnte ein kleiner Teil der GE-VI Flotte mit erneuerbarem Biomethan autark betrieben werden. Dies wäre ein Schritt von einem reinen Werkhofsbetreiber zum einem autarken Kraftstoffhersteller. Aktuell beschränkt sich das verfügbare biologische Material auf 300 ha Holz oder 360 ha Grasschnitt entlang der Autobahnabschnitte, welches bei der Pflege anfällt. Holz und Gras könnten nicht in der gleichen Anlage zu Biomethan verarbeitet werden. (Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 2017). Betrachtet man Grasschnitt mit einem Gasertrag von 0.8 – 1.2 kWh Biogas pro ha Grünfläche, würde 360 kWh Biogas produziert werden können. (Quelle: Leitfaden Biogasausbeute) Bei ca. 10 kWh pro l Diesel würde dies etwa 36 l Diesel im Jahr ersetzen. Diese grob vereinfachte Abschätzung zeigt das geringe Potential von Grünschnitt bzw. Holz auf. Zusätzlich besteht die Gefahr der Verunreinigung des Grasschnitts durch Schwermetalle und Neophyten. Soll der Gärrest der Biogasanlage auf landwirtschaftliche Felder ausgebracht werden, müssen gemäss der Chemikalien Risikoreduktions Verordnung (ChemRRV, 18. Mai 2005) klare Grenzwerte bezüglich der Schwermetalle eingehalten werden. Zusatzkosten bei der Deponieentsorgung müssten auch betrachtet werden. Dies könnte in einer Machbarkeitsstudie genauer untersucht werden, welche nicht Teil dieses Projekts ist.

1.5 Zusammenfassung der Marktsituation

Basierend auf den Erkenntnissen der Marktstudie wird erwartet, dass batterieelektrische Fahrzeuge die dominierende Technologie in der Automobilindustrie werden, aufgrund von Vorschriften zur Verringerung der CO₂-Emissionen und finanzieller Anreize für den Kauf von Elektroautos. Der Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge ist von 0,28 % der Neuzulassungen im Jahr 2012 auf fast 18 % im Jahr 2022 gestiegen, während Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge im Jahr 2022 nur 8 Neuzulassungen aufweisen. Das EU-Parlament hat ausserdem beschlossen, dass ab 2035 keine Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren mehr zugelassen werden dürfen. Daher wird erwartet, dass batterieelektrische Fahrzeuge vor allem im Stadt-

und Regionalverkehr eingesetzt werden, und die Hersteller erweitern ihr Produktportfolio in Richtung batterieelektrische Fahrzeuge.

Im Gegensatz zu BEV und FCEV stehen für biogene Kraftstoffe bereits eine grosse Anzahl an Fahrzeugen auf dem Markt zur Verfügung, da hierfür keine neuen Technologien erforderlich sind. Diese gelten ebenfalls als nachhaltige Alternative zu fossilen Brennstoffen, um die CO₂-Emissionen, um bis zu 85% im Verkehr zu reduzieren. Bei biogenen Treibstoffen liegt die kritische Betrachtung allerdings nicht in der Markverfügbarkeit der Fahrzeuge, sondern in Bezug auf die Herstellung und Verfügbarkeit des Kraftstoffs selbst. Da eine reine Substitution fossiler Treibstoffe mit biogenen oder synthetischen Treibstoffen hinsichtlich der Produktionskapazitäten nicht möglich ist, wäre allenfalls eine Reduktion der CO₂ Emissionen über eine Beimischung für einen Übergangszeitraum denkbar.

Bei den Nutzfahrzeugen sind es vor allem wirtschaftliche Gründe die zur Kaufentscheidung führen. Es wird erwartet, dass die Gesamtbetriebskosten für Elektro-Lkw in wenigen Jahren in vielen Bereichen niedriger sein werden als für Diesel-Lkw. Auch die grossen Hersteller der Branche erweitern ihr Produktportfolio in Richtung batterieelektrische Fahrzeuge.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass batterieelektrische Antriebe entsprechend der Ergebnisse des Berichts als Antriebstechnologie des nächsten Jahrzehnts zu empfehlen sind. Allerdings gibt es noch technische Entwicklungsdefizite, wie z.B. die begrenzte Verfügbarkeit von Hochleistungs-ladestationen und fehlendes Systemwissen, um die Ladeinfrastruktur netzfreundlich in das Energiesystem zu integrieren. Darüber hinaus werden Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge im täglichen Einsatz erprobt und es gibt einige Hersteller mit Klein-Serien auf dem Markt. Es bestehen allerdings Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Verfügbarkeit von grünem Wasserstoff für den Mobilitätssektor sowie dem Ausbau der Tankstellen Infrastruktur.

Kriterium	BEV Battery Electric Vehicle Batterieelektrische Fahrzeuge	FCEV Fuel Cell Electric Vehicle Brennstoffzellenfahrzeuge	ICEV Internal Combustion Engine Vehicle with Bio-/Synfuels Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, betrieben mit Biologischen- oder Synthetischen Kraftstoffen
Energieeffizienz (Well-to-Wheel)	sehr gut (ca. 77 %)	mässig (ca. 33 %)	schlecht (ca. 21 %)
CO ₂ Emissionen (Tank-to-Wheel)	sehr gut (keine CO ₂ Emissionen)	sehr gut (keine CO ₂ Emissionen)	neutral (CO ₂ Reduktion bis zu 85 %)
Fahrzeugkosten	hoch	hoch	gut (ohne Umrüstung)
Verfügbarkeit auf dem Markt	vorhanden	schlecht	gut
Treibstoffkosten	gut	hoch	hoch
Verfügbarkeit Treibstoff	gut	schlecht	schlecht
Komplexität Technologie	einfach	komplex	einfach
Infrastruktur	vorhanden	sehr wenige Tankstellen	vorhanden

Abbildung 4: Bewertung der Antriebstechnologien

Abschliessend lässt sich festhalten, dass BEV die Antriebstechnologie mit dem grössten CO₂-Einsparpotential, sowie den geringsten Hürden für die Umsetzung ist. Voraussetzung ist die Verfügbarkeit von grünem Strom und einer angemessenen Netzinfrastruktur.

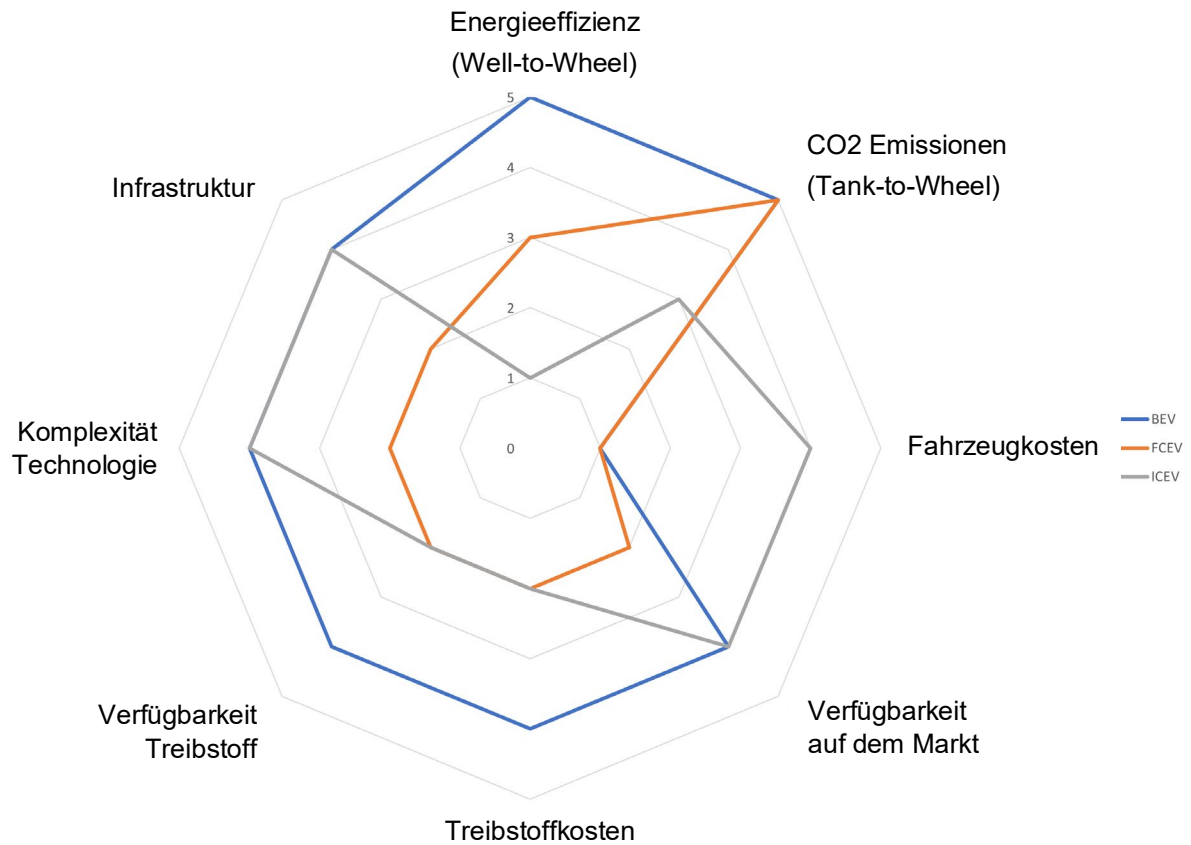


Abbildung 5: Vergleich der drei betrachteten Antriebstechnologien (max. 5 Punkte für beste Zielerreichung). BEV= Batterie Electric Vehicle, FCEV = Fuel Cell Electric Vehicle, ICEV = Internal Combustion Engine Vehicle

2. Analyse Fuhrpark

Um die Validität der Aussagen bezüglich der Anforderungen an die Umrüstung der Fahrzeuge (insbesondere im anspruchsvollen Winterdienst) zu erhöhen, wurde neben der Betriebsdatenauswertung, eine zusätzliche Telematik in Winterdienstfahrzeuge eingebaut, um genauere Verbrauchsdaten zu erfassen. Die Kategorisierung der Fahrzeuge wurde entsprechend der ASTRA-Kategorien vorgenommen.

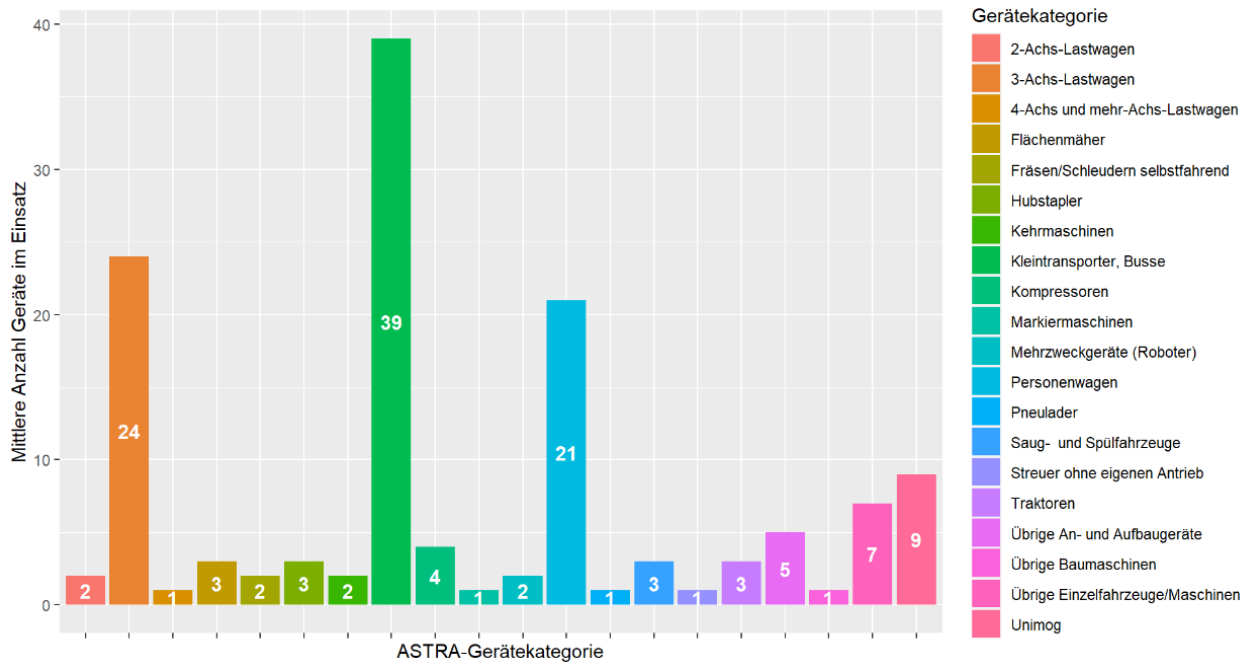


Abbildung 6: Fuhrparkanalyse. Mittlere Anzahl jährlich eingesetzter Fahrzeuge pro Kategorie

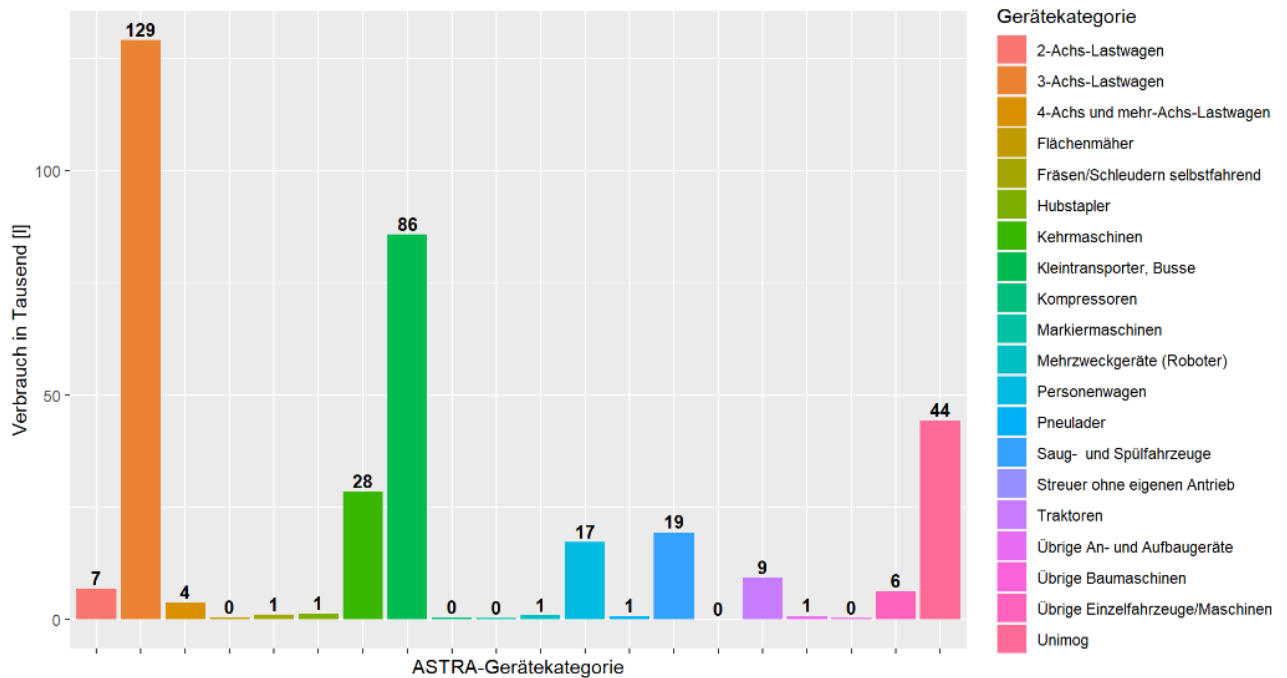


Abbildung 7: Mittlerer jährlicher Treibstoffverbrauch aller Fahrzeuge, sortiert nach Kategorie

Die zahlreichsten Fahrzeuge (Abbildung 6) sind 3-Achs-Lastwagen (24), Kleintransporter/ Busse (39), Personenwagen (21) und Unimogs (9), welche ebenfalls mitunter die höchsten mittleren Treibstoff-Verbräuche haben. Sie weisen zusammen mit den Saug- und Spülfahrzeugen (3) und den Kehrmaschinen (2) die höchsten absoluten Verbräuche aus (Abbildung 7).

Um die CO₂-Einsparpotentiale unter Einsatz alternativer Antriebstechnologien zu verdeutlichen, werden explizit die Verbräuche der Personenwagen, Kleintransporter/ Busse und 3-Achs-Lastwagen vertieft betrachtet (Abbildung 8).

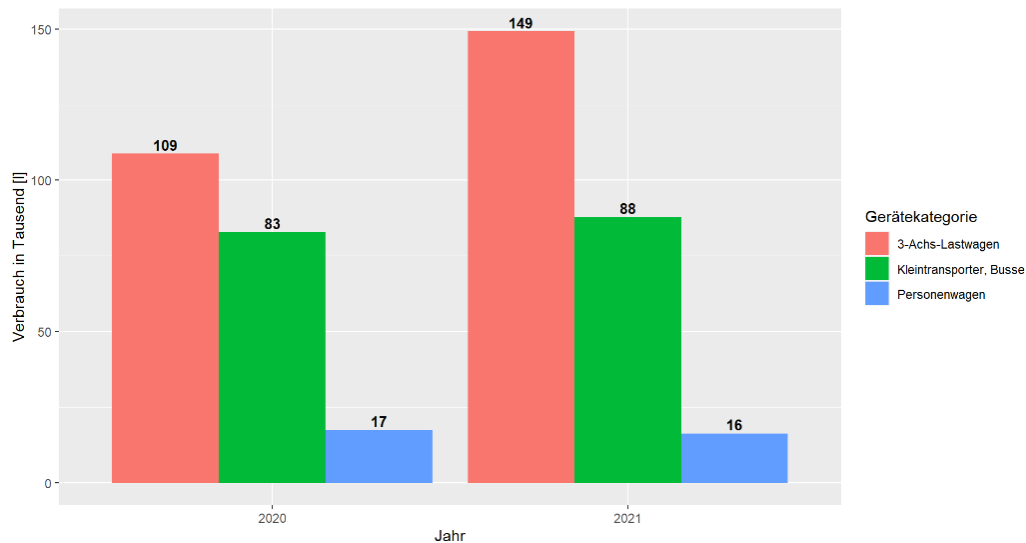


Abbildung 8: Jährlicher Treibstoffverbrauch ausgewählter Gerätekategorien

2.1 Vertiefte Betrachtung Fahrzeugkategorien

2.1.1 Personenkraftwagen

Die Pkw-Flotte des GE-VI verbraucht ca. 18'000 Liter Diesel pro Jahr. Zur Abbildung dieser Flotte konnte z.B. der VW Caddy Maxi mit einem Durchschnittsverbrauch von 6.79 l/100 km und einer jährlichen Fahrleistung von 10'000 km als eines von vier repräsentativen Fahrzeugen identifiziert werden.

Für den Ersatz dieser Fahrzeuge zeigt sich eine klare Tendenz zu batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV). Brennstoffzellen- (FCEV) und CNG-Fahrzeuge weisen eine geringe Marktdurchdringung auf. Damit ergibt sich der greifbarste Fall bei den Pkws, diese Fahrzeuge mit BEV zu ersetzen. Die CO₂ Einsparung (Tank to Wheel) wurde mithilfe des «Calculator» Tools des Paul-Scherrer-Instituts durchgeführt.

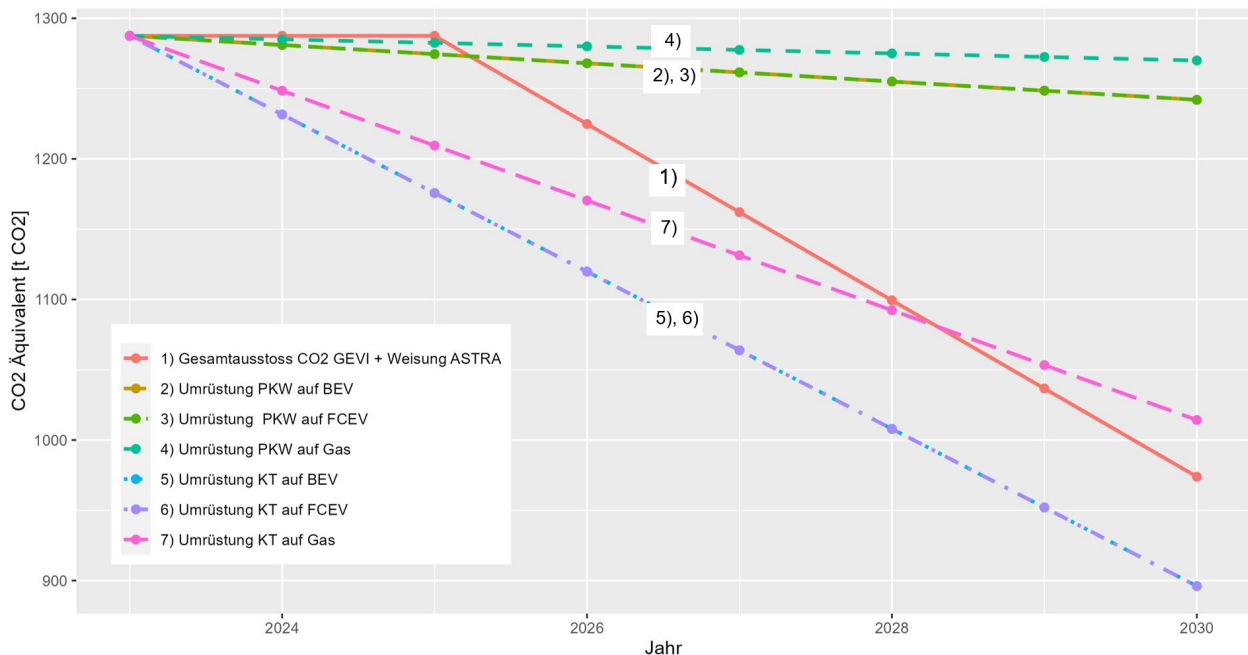


Abbildung 9: Jährlicher Rückgang der CO₂ Emissionen von GE-VI bei Personenkraftwagen (Pkw) und Kleintransportern, Bussen (KT): Pkw-Flottenumrüstung auf BEV (braun), FCEV (hellgrün) und gasbetriebene (dunkelgrün) Antriebssysteme. Die Geraden zeigen die CO₂ Einsparung, falls jedes Jahr 1/7 der Flotte ersetzt wird. Gegenübergestellt in orange ist die Weisung des ASTRA.

In Abbildung 9 ist zu erkennen, dass die BEVs gegenüber FCEVs und gasbetriebenen Fahrzeugen mehr CO₂ einsparen, da hier beim Betrieb keine direkten Emissionen entstehen. Der alleinige Ersatz der Pkw-Flotte durch BEVs reicht allerdings nicht aus, um die Weisung des ASTRA bis 2030 einzuhalten. Aus diesem Grund wurde in einem ersten Versuch zusätzlich die Umrüstung der Kleintransporter- und Bus-Flotte integriert.

2.1.2 Kleintransporter, Busse

Die Flotte der Kleintransporter und Busse weist einen Jahresverbrauch von 890'000 km und rund 80'000 Liter Diesel aus. Für die repräsentative Abbildung dieser Flotte im «Calculator» Tool des Paul-Scherrer-Instituts wurden in einem ersten Schritt zwei Fahrzeugtypen bestimmt:

- MAN TGE 3.180 DK mit einem durchschnittlichen Verbrauch von 11.74 l/100km
- Mercedes-Benz - Sprinter - 316 CDI mit einem durchschnittlichen Verbrauch von 8.34 l/100km

Zur Vereinfachung wurde eine durchschnittliche Laufleistung von 18'000 km/Jahr angenommen. Die Reduktion der operativen CO₂ Emissionen (Tank to Wheel) ist ebenfalls in Abbildung 9 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass die Ziele des ASTRA (bis 2030) einzig durch eine Umstellung der Pkw auf BEVs oder FCEVs nicht zu erreichen sind. Es müssten mindestens Kleintransporter und Busse (KT) umgestellt werden.

2.1.3 3-Achs Lkw

Die Flotte der 3-Achs Lkw weist bei einer Laufleistung von 205'000 km/Jahr einen Jahresverbrauch von 129'000 Liter/Jahr aus. Aufgrund mangelnder marktreifer Alternativen wird für die 3-Achs Lkws nur auf BEV fokussiert. Zur Prüfung der Eignung von BEV im Winterdienst wird anhand historischer Daten eines Extremfalls die Dimensionierung des Fahrzeugs und der zugehörigen Ladeinfrastruktur präsentiert.

- Scania G440CB 3-Achs Lkw mit einem durchschnittlichen Verbrauch von 88 l/100km

Bezüglich der Dimensionierung des BEV-Betriebs wird angenommen, dass ein 750 kWh Fahrzeug mit einer C-Rate¹ von 1.2 mit etwa 900kW nachladen wird. Ein 1'000 kWh Fahrzeug kommt entsprechend auf eine Ladeleistung von 1'200kW. Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen den Ladezustand eines E-Lkw mit 750 kWh resp. 1'000 kWh Akkukapazität bei unterschiedlich langen Ladezeiten. Das zugrundeliegende Verbrauchsmuster stammt aus dem intensivsten Winterdiensttag im Betrachtungszeitraum. Die Ladezeiten = IST simulieren die Beladung eines E-Lkw analog zu der Dauer der Betankung mit Diesel. Die weiteren Verläufe zeigen entsprechende Anpassungen der Ladezeiten. Es lässt sich festhalten, dass Ladezeiten von E-Lkws nicht mit den Tankzeiten von Dieselfahrzeugen konkurrieren können. Um den Betrieb mit einem 750 kWh E-Lkw gewährleisten zu können, sind Ladezeiten von mindestens 25 Minuten erforderlich.

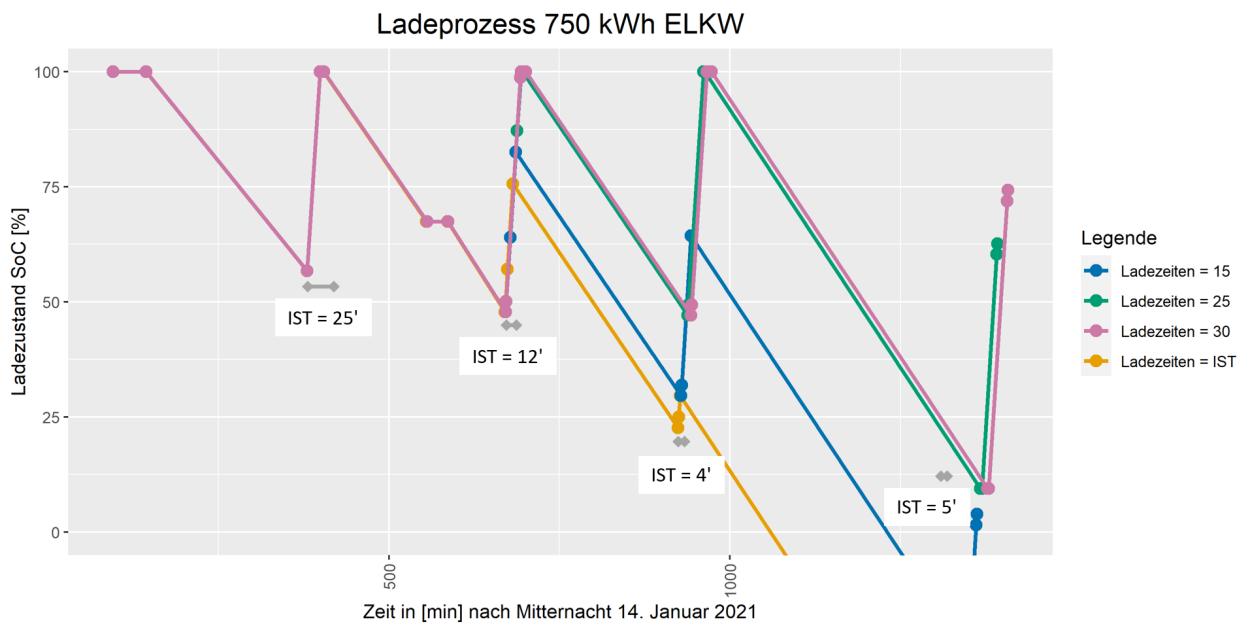


Abbildung 10: Ladeprozess 750 kWh E-Lkw

Bei E-Lkws mit zusätzlichen Akkupaketen (1'000 kWh) verkürzen sich die benötigten Ladezeiten entsprechend. Wie in Abbildung 11 ersichtlich wird, kann bei dieser Dimensionierung bereits ab 15-minütigen Ladezeiten die geforderte operative Leistung erbracht werden.

¹ Die C-Rate ist die von Batterieexperten verwendete Einheit zur Messung der Geschwindigkeit, mit der eine Batterie vollständig geladen oder entladen wird. Ein Ladevorgang mit einer C-Rate von 1C bedeutet zum Beispiel, dass die Batterie in einer Stunde von 0-100% geladen wird.

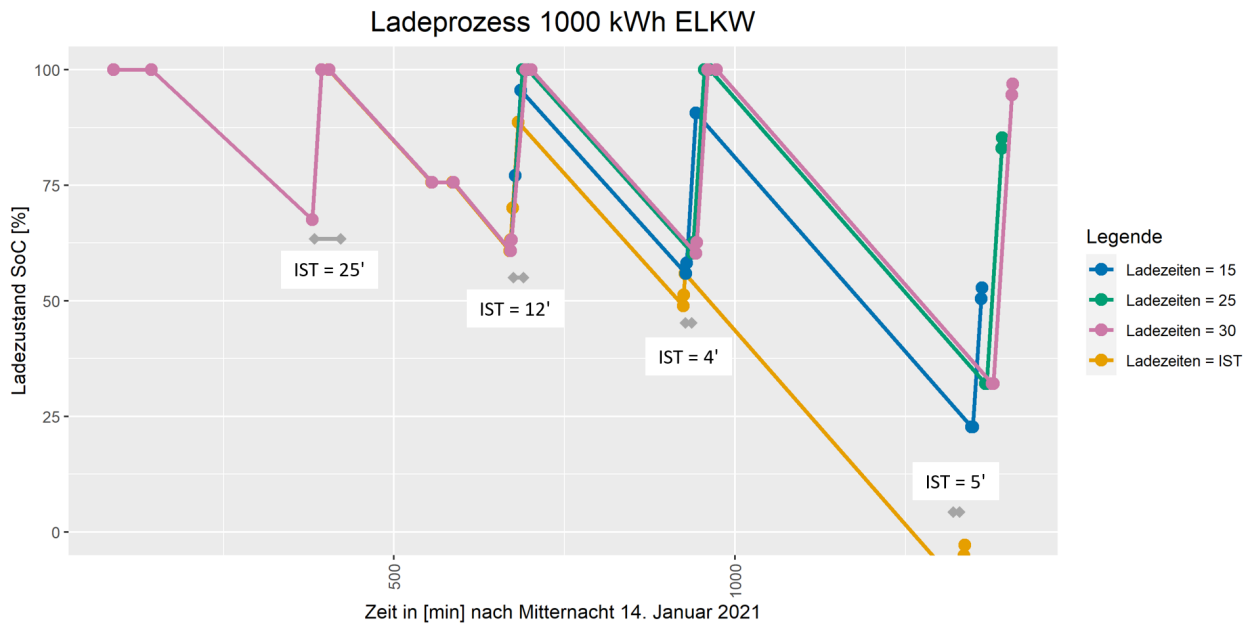


Abbildung 11: Ladeprozess 1'000 kWh E-Lkw

Aufbauend auf der Erkenntnis, dass E-Lkws in der Lage sind, die extremen Winterdienstseinsätze bei Ausdehnung der Tankpausen auf 25 Minuten zu bewältigen, wird zuletzt die benötigte Ladeinfrastruktur analysiert. Abbildung 12 stellt die Beladung des E-Lkws aus Sicht der Ladestation (Megacharger) dar. Im Einsatz eines E-Lkw bewegt sich der Ladezustand des Megachargers zwischen 65 - 100%. Damit lässt sich festhalten, dass ein Megacharger in dieser Konfiguration grundsätzlich den Betrieb von bis zu drei 750 kWh E-Lkws abdecken kann, sofern überall mindestens 25-minütige Ladepausen eingeplant werden.

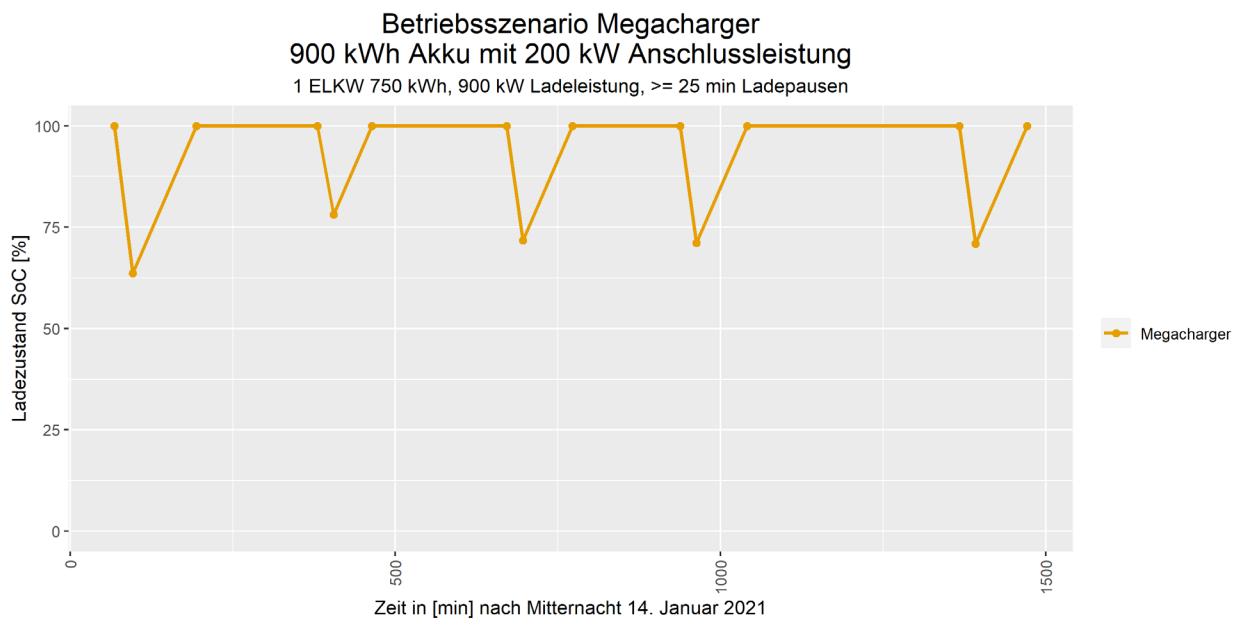


Abbildung 12: Betrieb des Megachargers

Um einem künftigen Zuwachs an batteriebetriebenen Fahrzeugen gerecht zu werden, sind Megawatt-Charger grösser dimensionierbar und könnten im Spitzenfall bis zu 2'300 kW abgeben. Entsprechend dem Anwendungsfall «Winterdienst» müssen mindestens 2 Fahrzeuge gleichzeitig eine Schnellladung (MCS)

machen können. Ein Megacharger stellt, Stand heute, nur 1 Mega Charging System (MCS) und 1 Combined Charging System (CCS) zur Verfügung. Spätestens bei der Dekarbonisierung der zweiten Hälfte der Flotte (ab ca. 2035) ist diesem Aspekt Rechnung zu tragen. Vermutlich hat sich die Technologie bis dann entscheidend weiterentwickelt.

2.1.4 Spezialfahrzeuge (Geräteträger)

In den nächsten 3-5 Jahren werden keine marktreifen Alternativen erwartet. Der Nutzen und die konkreten Anwendungsfälle sind kritisch zu hinterfragen. Ein allfälliger Zusammenschluss aller Gebietseinheiten mit einer Sammelbestellung könnte ein Weg sein, um Hersteller auf einen Bedarf aufmerksam zu machen. Nach Rücksprache mit Daimler, gibt es, z.B. aktuell keine alternative Antriebstechnologien für die Unimog Serie.

3. PV-Potentialbetrachtung Ge-VI Standorte

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine PV-Potentialbetrachtung für die sechs Standorte des Ge-VI durchgeführt. Das Hauptaugenmerk lag darauf, das Solarpotential der Standorte zu ermitteln und dessen Potential für eine zukünftige Versorgung der Flotte von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) zu bewerten. Es bleibt zu berücksichtigen, dass der Netzanschluss voraussichtlich zu einem Engpass wird, wenn die Flotte erweitert wird. Daher war es wichtig, die vorhandene Infrastruktur zu überprüfen und mit den Anforderungen eines wachsenden BEV-Fuhrparks in Einklang zu bringen.



Im Folgenden wird der Prozess zur Herleitung der Informationen für die PV-Potentialbetrachtung kurz beschrieben:

- PV-Potenzial-Ermittlung: Dazu wurden Google Maps und die Datenquelle "Wie viel Strom oder Wärme kann mein Dach produzieren?" (admin.ch) genutzt, um genaue Informationen über das Solarpotential der Standorte zu erhalten. Hier ein Beispiel zur Visualisierung:
- Zusammenfassung der Ergebnisse: Die ermittelten Daten wurden zusammengefasst und in einer Tabelle dargestellt, die das Solarpotential für jeden Standort und das Gesamt-Solarpotential enthält. Zudem wurde der Effektivwert des Solarpotenzials berechnet.

Die PV-Potentialbetrachtung ergab folgende Erkenntnisse:

- Hauptsitz St. Gallen: Das Solarpotential am Hauptsitz St. Gallen beträgt 396'200 kWh/Jahr.
- Oberbüren: Dieser Standort wird voraussichtlich 2029 von Grund auf erneuert. Das Potential mit der aktuellen Bebauung beträgt 602'700 kWh/Jahr.
- Müllheim: Der Standort Müllheim weist ein Solarpotential von 442'520 kWh/Jahr auf.
- Thal: Thal zeigt das höchste Solarpotential von 1'171'200 kWh/Jahr. Eine Erneuerung ist geplant, jedoch existiert bisher kein Zeitplan.
- Mels: Das Solarpotential in Mels beträgt 896'900 kWh/Jahr. Eine Erneuerung ist geplant, jedoch existiert bisher kein Zeitplan.
- Biäsche: Der Standort Biäsche verfügt über ein Solarpotential von 795'500 kWh/Jahr.

Insgesamt beträgt das Solarpotential aller Standorte 4'305'020 kWh/Jahr, was einem theoretischen Potenzial von 4.30 GWh/Jahr entspricht. Diese Zahlen zeigen das Gesamtpotenzial der Standorte für die Nutzung von Solarenergie und verdeutlichen die Möglichkeiten, den Energiebedarf des wachsenden BEV-Fuhrparks mit nachhaltigen Energiequellen zu decken für den Fall, dass die an den Standorten verfügbaren Dachflächen komplett mit Solarpanels ausgestattet werden. Nachfolgend wird zuerst der aktuelle Energiebedarf von den Fahrzeugkategorien 3-Achs LKW, Kleintransporter, Busse und PKW ermittelt. Anschliessend wird der ermittelte Energiebedarf mit dem PV-Potential der Werkhöfe in Relation gebracht. Entsprechend der durchschnittlichen Laufleistung (2021) der einzelnen Fahrzeugkategorien, und dem ermittelten Energieverbrauch (kWh/km) ergibt sich für die drei Fahrzeugkategorien ein Gesamtverbrauch von 931'565 kWh pro Jahr (Tabelle 1 - Ermittlung Energiebedarf).

Tabelle 1 - Ermittlung Energiebedarf

	Umrechnungsfaktor [kWh/l]	Mittlerer Energieverbrauch pro km pro Fahrzeug Verbrenner [l/km]	Laufleistung pro Jahr [km/Jahr]	Energieverbrauch pro km pro Fahrzeug elektrisch [kWh/km]	Gesamtverbrauch [kWh/Jahr]
3-Achs LKW	3.2	0.5	299'000	1.6	478'400
Kleintransporter, Busse	4.5	0.11	800'000	0.495	396'000
PKW	3.7	0.05	309'000	0.185	57'165
Summe			1'408'000		931'565
Quelle	DW, Carculator	Carculator	GE-VI Daten	eigene Berechnung	eigene Berechnung

Zu Verdeutlichung des PV-Potentials, stellt Tabelle 2 den Ausnutzungsgrad im Falle eines sofortigen Ausbaus aller Standorte dar. Wenn bereits heute 75% der verfügbaren Flächen mit PV-Anlagen ausgestattet wären, läge der theoretische Eigenversorgungsgrad gegen 2050 bei ca. 350%.

Tabelle 2 - PV- Eigenversorgungsgrad

Gesamtenergiebedarf [kWh/Jahr]	PV-Potential [kWh/Jahr]	PV-Ausbauquote [%]	Potential Eigenversorgung [%]
931'565	4'305'020	75.00	347

Diese Erkenntnisse zeigen, dass eine 100%ige Eigenversorgung mit PV-Energie realisierbar ist. Unter Berücksichtigung der saisonalen Schwankungen der PV-Energieproduktion, scheint die Umwandlung in alternative Energieträger zur Speicherung eine viable Option. Da durch den Transfer der Sommerenergie in den Winter die Energie zweimal umgewandelt werden muss, geht gemäss den jeweiligen Wirkungsgraden eine gewisse Energie verloren. Zum Beispiel läge der Eigenversorgungsgrad bei der H2-Technologie über 100% (bei einem angenommenen Wirkungsgrad von 33%; bedingt durch die zwei Umwandlungsverfahren). Somit bleibt zum Beispiel die H2-Speicherung eine sinnvolle Technologie, um überschüssige PV-Energie aus dem Sommer in den Winter zu retten und so einen Beitrag zur autarken Energieversorgung zu leisten.

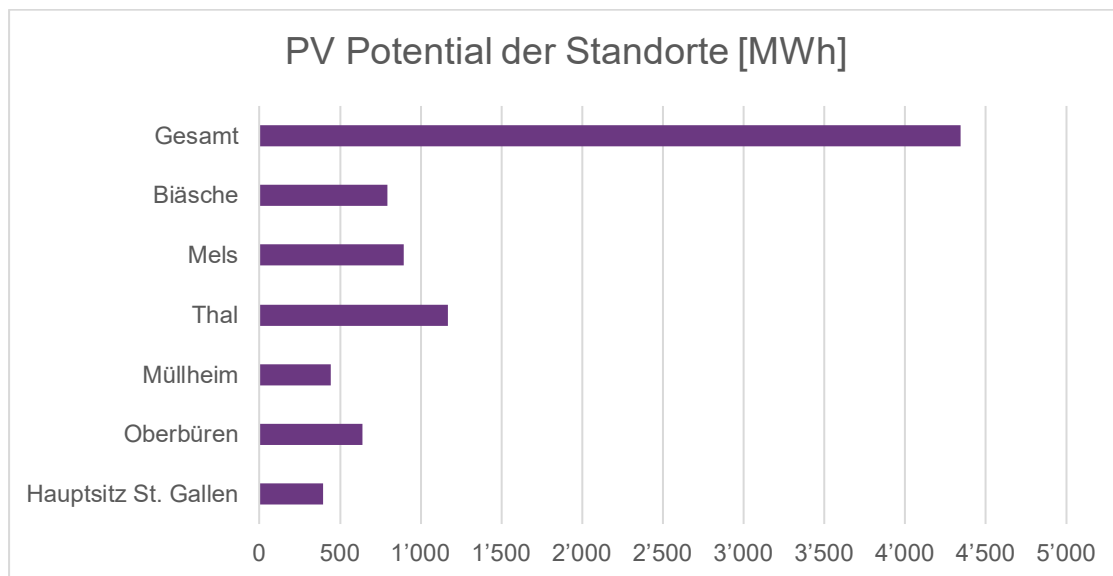


Abbildung 13: Jährliches Potential von Photovoltaik-Anlagen an den Standorten

Durch die Identifizierung der Standorte mit hohem Solarpotential können geeignete Massnahmen und Priorisierungen vorgenommen werden, um die vorhandene Infrastruktur an die Anforderungen eines wachsenden Fuhrparks anzupassen. Darüber hinaus bieten die Daten die Möglichkeit, das Potential für die Produktion von Wasserstoff (H2) an jedem Standort zu bewerten. Auf dieser Grundlage können später mit Hilfe geeigneter Simulationsverfahren detaillierte Aussagen zur verfügbaren Kapazität der Energiespeicher in zeitlicher Betrachtung getätigt und abgeschätzt werden, wann wie viele Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs) mit dieser erneuerbaren Energiequelle betrieben werden können. Um einen Anhaltspunkt für die Beurteilung des H2 Potentials zu bekommen, wird in Abschnitt 4.3 die Menge Wasserstoff zur Deckung des Energiebedarfs der 3-Achser Flotte während 3 Tagen hartem Winterdienst visualisiert (siehe 2.1). Wenn Fragen dieser Art konkretisiert betrachtet werden sollen, besteht die Möglichkeit mit dem «PtX Tool» des OST-IET zu unterstützen.

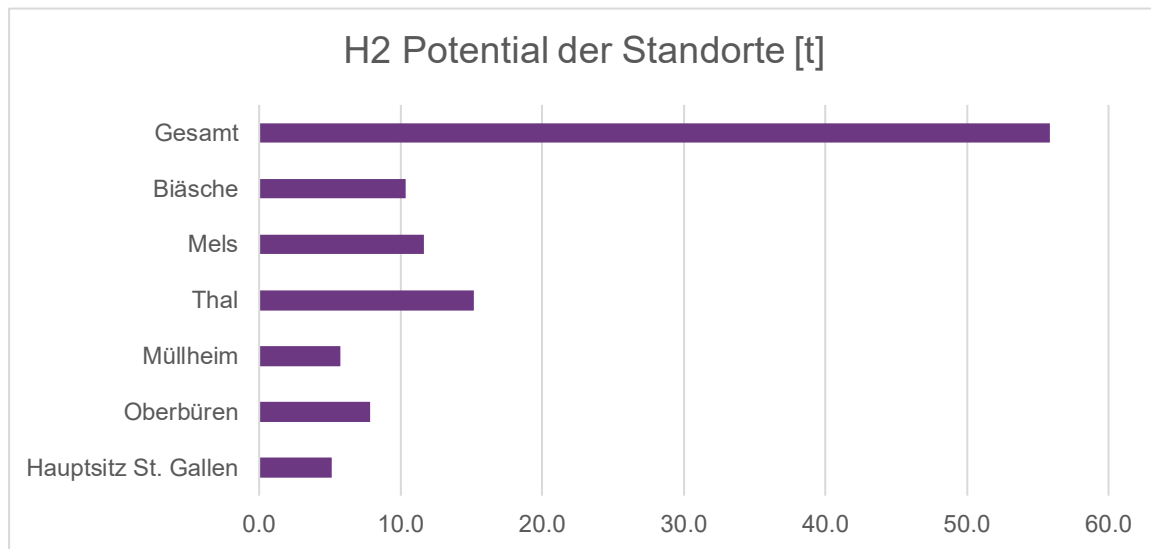


Abbildung 14: Jährliches Potential zur Wasserstoffproduktion der Standorte in [t]

Die PV-Potentialbetrachtung liefert somit wichtige Erkenntnisse für die Planung und Umsetzung eines nachhaltigen und effizienten Flottenausbaus von BEVs. Sie ermöglicht es, die verfügbare Infrastruktur optimal zu nutzen und den fossilen Energieverbrauch durch den Einsatz erneuerbarer Energien im operativen Geschäft zu ersetzen.

4. Risikobetrachtung Einsatz BEV

Im nachfolgenden findet eine allgemeine Betrachtung zu etwaig auftretenden Risiken bei einer Umstellung der Fahrzeugflotte auf BEV statt. Für die Betrachtung der betrieblichen Risiken wurde am 11.07.2023 ein Experteninterview mit Martin Wyss (Organisation für Stromversorgung in Ausserordentlichen Lagen-OSTRAL) durchgeführt. Des Weiteren werden Risiken in Bezug auf Elektromobilität und Tunnelbränden erläutert.

4.1 Betriebliche Risiken

4.1.1 Erkenntnisse aus dem Experteninterview mit Martin Wyss:

Nicht nur im Bereich der Pkws, sondern auch bei den Lkws wird auf Elektrofahrzeuge umgestellt. Diese Umstellung erfolgt schrittweise, und derzeit ergibt sich finanziell nur bei Elektrofahrzeugen eine Sinnhaftigkeit. Die meisten Gebietseinheiten, einschliesslich der Werkhöfe, setzen auf batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), abhängig von den Verteilnetzbetreibern oder dem Kanton. Dadurch können auch hybride Lösungen entstehen, die verschiedene Anforderungen erfüllen.

Um den steigenden Strombedarf, der von Elektrofahrzeugen ausgeht, zu decken, muss die Elektroinfrastruktur kontinuierlich ausgebaut werden. Derzeit wird der Werkhof Wallisellen in Zürich (GE-VII) umfassend saniert. Im Rahmen dieser Sanierung werden verschiedene Massnahmen ergriffen, um die angestrebten Klimaschutzziele des ASTRA auf dem Werkhof zu erfüllen. Eine wichtige Komponente dabei ist der Ausbau der Photovoltaikanlagen, die es ermöglichen werden, einen Teil des benötigten Stroms vor Ort zu erzeugen. Zudem hat man bereits einen Teil der Pkws auf Elektrofahrzeuge umgestellt, um den CO₂-Ausstoss über eine Nutzung von erneuerbaren Energien zu reduzieren. Um den wachsenden Anforderungen der Versorgung durch elektrische Energie gerecht zu werden, wird der Werkhof um eine neue Trafostation erweitert, um eine Ladeleistung von bis zu 1 MW zu ermöglichen. Hierbei wird GE-VII

die Kosten allerdings zu 100% selbst tragen. Es wird erwartet, dass der Bau voraussichtlich im Jahr 2027 stattfindet. Zusätzlich werden die Werkhöfe mit PV-Anlagen ausgestattet, um einen Teil des benötigten Stroms zu liefern und die Elektromobilität weiter zu unterstützen. Die Trafostationen müssen zudem für die Einspeisung des erneuerbaren Stroms zurück ins Verteilnetz an jedem Werkhof ausgebaut werden.

Es ist wichtig, dass der Ausbau der Elektroinfrastruktur gesamtheitlich betrachtet wird und zusammenhängend erfolgt. Damit ist gemeint, dass die relevanten Akteure (EW; Kantone, Gemeinden, regionaler Nachfrager) beteiligt sind. Eine der zentralen Herausforderungen aktuell ist, dass die Finanzierung dieses Ausbaus nicht in der Verantwortung der Energiewerke liegt. Der Kanton Fribourg wird als Best Practice Beispiel genannt, bei dem der Kanton, die Gemeinde und der Verteilnetzbetreiber (EW) gemeinsam an Bord sind, um die Strategie auszurichten. Es ist besonders wichtig, sich an der kantonalen Strategie zu orientieren, schon allein aus finanziellen Gründen, da die Investitionen hoch sind. Um einen Ausbau der Infrastruktur zu gewährleisten, muss langfristig auch auf kantonaler Ebene eine enge Zusammenarbeit mit der Industrie erfolgen.

4.1.2 Einschätzung der betrieblichen Nutzung von H₂ in der Mobilität in den nächsten 10 Jahren:

In den nächsten 10 Jahren werden sowohl Lösungen mit Wasserstoff (H₂) als auch mit batterieelektrischen Fahrzeugen vorhanden sein. Je nach betrachtetem Anwendungsfall wird die eine oder andere Technologie ihre Vorzüge haben. Für die Gebietseinheiten steht derzeit hauptsächlich die Nutzung von BEVs im Raum. Wasserstoff hat zum momentanen Zeitpunkt kaum Anwendungsmöglichkeiten in der Mobilität, ausser bei Langstreckentransportern, die aus logistischen Gründen eine hohe Reichweite mit entsprechend hoher Energiedichte erforderlich machen. Der Fokus des Bundes liegt in den nächsten 10-15 Jahren auf dem Ausbau der Infrastruktur zum Import von grünem H₂ über Pipelines. Es ist eher unwahrscheinlich, dass Schweizer Strom in den nächsten 20 Jahren zur Wasserstoffproduktion verwendet wird. Wasserstoff würde extern bezogen werden, möglicherweise über das EU-Netzwerk (Hydrogen Backbone) in Zusammenarbeit mit der Europäischen Union.

Die Umstellung auf elektrische Lkws erfolgt nicht sofort. Dies hat zum einen ökonomische Gründe und zu anderen da es hier noch Erkenntnisse für den kritischen Winterräumdienst zu gewinnen gilt. Dieser Prozess wird jedoch weiterhin beobachtet, um in Zukunft auch im Winterdienst auf Elektrofahrzeuge umstellen zu können. Zudem ist nach Aussage des Experten allgemein davon auszugehen, dass die Schneehäufigkeit in den tieferen Lagen in den nächsten 10 Jahren weiterhin stark abnehmen wird, bei jedoch steigender Wahrscheinlichkeit von extremen Wetterereignissen. Während sich dadurch der kritische Sonderfall des Schneeräumbetriebs potentiell reduziert, muss eine Reduktion des Anforderungskatalogs an die Gebietseinheiten für extreme Wetterereignisse seitens des ASTRA in Betracht gezogen werden.

4.1.3 Versorgungssicherheit in Bezug auf Netzstabilität:

Im Übertragungsnetz ist es nicht möglich, Strom zu speichern. Daher ist es erforderlich, dass die Einspeisung und Ausspeisung von Strom immer im Gleichgewicht sind. Dies bedeutet, dass die Produktion und der Verbrauch von Energie stets ausgeglichen sein müssen, um einen sicheren und stabilen Betrieb des Netzes mit einer konstanten Frequenz von 50 Hertz zu gewährleisten. Diese Frequenz wird nicht nur im Schweizer Übertragungsnetz, sondern auch im gesamten europäischen Verbundnetz verwendet. In Fällen unvorhergesehener Schwankungen greifen die Betreiber in den Netzleitstellen auf Regelenergie zurück. Regelenergie dient als Reserve, die von den Kraftwerken bereitgestellt wird und bei Bedarf abgerufen werden kann. Die Kraftwerke passen kurzfristig ihre Leistung an, entweder um die fehlende elektrische Energie auszugleichen oder um überschüssige Energie zu kompensieren.

Um die Sicherheit des Stromnetzes zu gewährleisten, wurden verschiedene Sicherheitsmassnahmen implementiert. Eine solche technische Sicherheitsmassnahme ist der automatische frequenzabhängige Lastabwurf. Beim Lastabwurf im Stromnetz werden bestimmte Versorgungsgebiete abgeschaltet, um möglichen Gefahren vorzubeugen. Diese Abschaltung erfolgt automatisch, sobald vordefinierte Messwerte

erreicht werden. Die Sicherheit des Stromverbunds hängt davon ab, dass alle europäischen Länder dieselben Sicherheitsregeln befolgen. Der Lastabwurf ist eine wichtige Sicherheitsmassnahme und stellt die letzte Möglichkeit dar, einen möglichen Zusammenbruch des Stromnetzes oder grösserer Teile davon zu verhindern. Darüber hinaus werden dadurch grössere Schäden an Kraftwerken vermieden. Gründe für einen Lastabwurf können eine Unterfrequenz, Unterspannung oder Überlastung von Betriebsmitteln wie Leitungen oder Transformatoren sein. Beim automatischen frequenzabhängigen Lastabwurf besteht für alle Stromkonsumenten die gleiche Wahrscheinlichkeit, von einem solchen Versorgungsausfall betroffen zu sein. Nach dem Einsatz dieser Notmassnahme wird die Stabilität des Stromnetzes wiederhergestellt und die abgeschalteten Kunden können innerhalb weniger Stunden wieder mit Strom versorgt werden. Durch dieses solidarische Verhalten wird die Netzstabilität und somit die Versorgungssicherheit gewährleistet. Durch den Ausbau der erneuerbaren Energien und den steigenden Konsum von Elektrizität wird der Leistungsbezug zukünftig lastgesteuert geregelt werden. Um die Netzstabilität zu gewährleisten, müssen langfristig Technologiekonzepte wie bidirektionales Laden implementiert werden.

Konzepte mit Dieselgeneratoren für Notladevorgänge sind nach Aussage von Martin Wyss derzeit kein Thema, da keine dezentralen Lösungen bevorzugt werden. Dies führt wahrscheinlich zu neuen Geschäftsmodellen und in den kommenden Jahren werden weitere Erkenntnisse aus den gesammelten Erfahrungen gewonnen. Bis zum Jahr 2030 wird eine nationale Aufbauphase für PV- und H₂-Infrastrukturen erwartet. Ab diesem Zeitpunkt wird der Markt für H₂-Infrastruktur relevant sein und zusätzliche Entwicklungen vorantreiben.

4.2 Elektromobilität und Tunnelsicherheit

Eine Studie auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS) aus dem Jahr 2018 zeigt, dass schwere mechanische und thermische Schäden an Batterien von Elektrofahrzeugen zu sofortigen, unkontrollierbaren Bränden führen können. Hierdurch entstehen eine hohe Energiefreisetzung, erhebliche Rauchentwicklung und die Freisetzung neuer Schadstoffe. Während die Ausweitung der Elektromobilität die Tunnelsicherheit insgesamt nicht beeinträchtigt, wirkt sie sich allerdings auf die Gefahrensituation in Strassentunneln aus und beeinflusst insbesondere das Störfallmanagement.

Die Versuche der betrachteten Studie fanden in den unterirdischen Anlagen der Versuchs Stollen Hagerbach AG statt, die eine realistische Umgebung für Brandversuche in Strassentunneln bieten. Der Fokus lag insbesondere auf der Rolle der Batterie als chemischer Energiespeicher mit dem Ziel, eine Lithium-Ionen-Batterie, die in einem für den Strassenverkehr zugelassenen vollelektrischen Fahrzeug (Stand 2017) eingesetzt wird, maximal zu schädigen. Es ist wichtig anzumerken, dass die Studie keine Brand- oder Crashtests an kompletten Elektrofahrzeugen beinhaltete und auch nicht die Wahrscheinlichkeit des Auftretens solcher Schäden analysierte. Als mögliche Ursachen für Brände von Elektrofahrzeugen in Strassentunneln wurden mechanische (z. B. Unfälle) und thermische (z. B. Brände) Schäden an den Batterien identifiziert, die zu einem thermischen Durchgehen führen. Neben der Erfassung von thermischen und visuellen Daten konzentrierten sich die Analysen vor allem auf die Untersuchung von Schadstoffemissionen.

Es gibt nur begrenzte Erfahrungswerte und statistische Daten über Unfälle oder Vorfälle mit Elektrofahrzeugen, da ihr Anteil am Gesamtfahrzeugbestand immer noch gering ist. Dies liegt hauptsächlich daran, dass Elektrofahrzeuge aufgrund ihrer geringen Verbreitung selten in Strassenverkehrsunfälle verwickelt sind. Zudem werden in den aktuellen statistischen Erhebungen die Fahrzeugtypen noch nicht nach Antriebsarten unterschieden, was bedeutet, dass elektrifizierte Fahrzeuge statistisch nicht erfasst werden, selbst wenn sie an einem Ereignis beteiligt waren oder es verursacht haben.

Obwohl davon ausgegangen wird, dass Elektrofahrzeuge nicht häufiger in Unfälle verwickelt sind als konventionelle Fahrzeuge, wären Unfallstatistiken dennoch hilfreich, um Erkenntnisse für den Umgang mit

solchen Vorfällen zu gewinnen und eine fundierte Risikobewertung durchführen zu können. Daher wird empfohlen, die bestehende Strassenverkehrsunfallstatistik der Schweiz, um die Kategorie «Elektrofahrzeuge» zu erweitern, um alle Fahrzeuge einzuschliessen, die mit elektrischer Energie betrieben werden, einschliesslich Hybridfahrzeugen.

Angesichts der zunehmenden Anzahl von Ladestationen in Infrastrukturen wie Parkhäusern und Garagen, sowie der potentiellen Brandgefahr durch Ladefehler, sollten auch bestehende Statistiken und Unfallanalysen von Einsatz- und Rettungskräften, wie beispielsweise kantonale Brandermittlungen, genauer betrachtet werden.

Die Ergebnisse der betrachteten Studie widerlegen die Hypothese, dass die Brandgefahren in Strassentunneln durch leistungsfähige Antriebsbatterien in Elektrofahrzeugen generell zunehmen werden. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass die thermischen Brandgefahren von Elektrofahrzeugen mit denen von konventionellen Fahrzeugen vergleichbar sind.

Forschungsergebnisse aus weiteren experimentellen Brandstudien mit kompletten Fahrzeugen (Colella, 2016, Lam, 2016, Lecocq, 2012) zeigen, dass Elektrofahrzeuge und herkömmliche Fahrzeuge ähnliche maximale Brandleistungen (ca. 5 MW) und Energiegehalte (ca. 7.000 MJ) aufweisen. Es ist daher davon auszugehen, dass Fahrzeugbrände in Strassentunneln weiterhin gemäss den relevanten Auslegungskriterien nach SIA 197/2 einzustufen sind. Die bestehenden Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen in Strassentunneln reichen aus, um diesen neuen Gefahren zu begegnen. Es werden daher nach aktuellem Stand keine technischen Anpassungen gefordert.

Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass diese Erkenntnisse speziell für Strassentunnel gelten und möglicherweise nicht auf andere unterirdische Infrastrukturen (z. B. Parkhäuser) übertragbar sind, die zunehmend von der Elektromobilität betroffen sind.

In unmittelbarer Nähe und bei ungünstigen Lüftungsbedingungen stellen Brände von Elektrofahrzeugen jedoch neue und potenziell schwerwiegendere chemische Gefahren dar. Bei Schadstoffanalysen wurden kritische Konzentrationen von Kobalt-, Mangan- und Lithium-Aerosolen festgestellt, die bei Bränden konventioneller Fahrzeuge nicht in so hohen Konzentrationen vorkommen. Diese Schadstoffe stellen ein Toxizitätsrisiko für Mensch und Umwelt dar.

Die vorliegenden Forschungsergebnisse zeigen derzeit allerdings keine erkennbare Notwendigkeit einer Anpassung der bestehenden BSA (Betriebs- und Sicherheitsausrüstung). In der Schweiz sind die Lüftungssysteme von Strassentunneln so konzipiert, dass sie grosse Brandereignisse mit erheblichen Schadstoffemissionen bewältigen können, um eine angemessene Selbstrettung der Tunnelbenutzer im Ernstfall zu ermöglichen. Zudem berücksichtigt die Lüftungsrichtlinie des ASTRA: 13001:2008 (2008) nicht nur Brandereignisse, sondern auch Unfälle, bei denen grosse Mengen an gefährliche Substanzen ohne Brand freigesetzt werden, und somit keine Brandleistung (0 MW) auftritt. Es ist anzunehmen, dass Brandereignisse mit BEVs hierüber abgedeckt sind.

Die Studie lässt abschliessend allerdings offen, ob es möglich ist, frühzeitig beschädigte BEVs z.B. durch Temperatur- und Schadstoffmessungen zu erkennen oder ob automatische Löschanlagen in Strassentunneln durch die wachsende Elektromobilität an Bedeutung gewinnen. Im Kontext des sich entwickelnden Mobilitätssektors werden diese Erkenntnisse den Einsatzkräften bei der Bewältigung zukünftiger Vorfälle helfen und die Betreiber anderer unterirdischer Verkehrsinfrastrukturen (z.B. Parkhäuser) für die sich verändernde Gefahrenlage sensibilisieren. Es müssen z.B. neue Konzepte zur Löschung und Evakuierung brennender BEV-LKW in Tunneln entwickelt und erprobt werden.

In Bezug auf die Nutzung von FCEV in Tunneln bestehen laut Kashkarov et al. (2022) durch die Speicherung des H₂ unter Drücken von 350/700 bar eines gewissen Potentials an Risiken. Im schlimmsten Fall, unter Verkettung mehrerer unwahrscheinlicher Umstände, besteht die Möglichkeit eines Berstens des H₂-Drucktanks. Um diese Gefahr auf ein Minimum zu reduzieren, werden in allen FCEV s.g. thermisch auslösende Druckentlastungsvorrichtung oder in engl. thermally activated pressure relief device (TPRD)

verbaut. Im Brandfall wird hierdurch der Druck aus der H₂-Hochdruckbehälter kontrolliert abgelassen und das Bersten des Tanks wird hierdurch vermieden. Es kann allerdings eine mehrere Meter lange Stichflamme entstehen. Selbst wenn diese H₂-Flamme direkt auf die Decke des Tunnels trifft, ist nicht davon auszugehen, dass die strukturelle Integrität des Tunnels oder der verbauten Stahlträger beeinträchtigt werden. Es können jedoch lokale Abplatzungen auftreten oder es kann zu einem Übergreifen auf andere Fahrzeuge führen. (LaFleur et al., 2017) Ob und Welche Massnahmen für Strassentunnel und andere unterirdische Verkehrsinfrastrukturen getroffen werden müssen ist Bestandteil aktuell laufender Forschung wie z.B. auf europäischer Ebene mit dem Forschungsprojekt HyTunnel (2023).

4.3 Versorgungsengpässe bei Strommangellagen

Ein wichtiges Risiko, welches die Elektrifizierung von Fahrzeugflotten mit sich bringt, sind Versorgungsengpässe bei Stromknappheit. Beim Eintritt einer Strommangellage entscheidet die OSTRAL – Organisation für Stromversorgung in ausserordentlichen Lagen – in Abhängigkeit der einzusparenden Strommenge darüber, welche von verschiedenen möglichen Massnahmen Einzelnen oder in Kombination einzusetzen sind. Muss der Stromverbrauch nur minimal reduziert werden, wird zuerst versucht, durch Sparappelle der Wirtschaftlichen Landesversorgung an alle Verbraucher, die Situation unter Kontrolle zu bringen. In weiteren Eskalationsstufen werden dann Verwendungsbeschränkungen und Verbote erlassen und Betriebsschliessungen in Erwägung gezogen. Als nächste Massnahme können durch OSTRAL Kontingentierungen von Grossverbrauchern angeordnet werden. Als ultimo ratio kann der Bundesrat über Netzabschaltungen verfügen, wovon dann alle Verbraucher betroffen sein können.

Die zur Bewältigung der Strommangellage eingesetzten Massnahmen werden in Zusammenarbeit mit Wirtschaft und Kantonen erarbeitet und verfolgen das Ziel, den volkswirtschaftlichen Schaden möglichst gering zu halten und um Wettbewerbsverzerrungen zu minimieren. In welchen Eskalationsstufen Einschränkungen für GE-VI in Kraft treten werden, ist nicht klar. (WBF, 2023)

Aus betrieblicher Sicht ist zu bedenken, dass es in Situationen mit erheblichen Strommangellagen, bei denen extreme Einsparungen wie 30% erforderlich wären, nach Aussage des Experten zu erheblichen Beeinträchtigungen des öffentlichen Lebens kommen würde. In solchen Situationen ginge es dann primär darum, den Betrieb von Spitälern und Blaulichtorganisationen aufrecht erhalten zu können. Die Autobahn gilt als kritische Infrastruktur und muss stets betrieben werden können, im schlimmsten Fall mit Einschränkungen (Temporeduktion, etc.). Es bedarf also die Klärung der Frage, in welchem Umfang der Auftrag der Gebietseinheiten reduziert werden kann, um deren Energiebedarf zu senken, ohne dabei die Erfüllung sicherheitsrelevanter Anforderungen an kritische Infrastruktur zu gefährden.

Um kurzfristige Versorgungsengpässe abzufedern, könnten gemäss Darstellung von H2 Energy (www.kvyreen.com) mobile Wasserstoff-Charger eine Abhilfe schaffen, die das Unternehmen im Juni 2023 dem ASTRA präsentiert hat. Mit Systemen dieser Art könnten für begrenzte Zeiträume die elektrifizierten Fahrzeuge Netzunabhängig geladen und deren Einsatz sichergestellt werden. Es ist hier allerdings anzumerken, dass die Ladeleistungen mit max. 160 kW bei diesem Produkt z.B. für den kritischen Fall über drei Tage Winterdienst für den Aufrechterhalt des Betriebs nicht ausreichen. Um einen mit Diesel Fahrzeugen vergleichbaren Betrieb zu gewährleisten, müssen entweder 900 kW Ladeleistung bereitgestellt werden, wodurch 25 min Ladezeit resultieren (vgl. Abschnitt 2.1 – 3-Achs Lkw). Oder es müssen mehrere der Kvyreen Systeme und zusätzliche BEV Lkw angeschafft werden. Hier gilt zu betrachten, dass ein elektro-autarker Betrieb zusätzliche Herausforderungen an die Netzanbindung stellt. Im autarken Betrieb ist eine Trennung vom Netzbetreiber herzustellen. Ausserdem ist bei Spannungsrückkehr aus dem Netz das Thema der Synchronisierung und Erstellung der Netzverbindung zu lösen. Diese Themen sind bei dem hier erwähnten grossen Leistungen tendenziell gross und teuer. Um genauere ökonomische Aussagen treffen zu können wäre eine detaillierte Flottenbetrachtung mit Fokus auf Flottenoptimierungspotentiale sinnvoll.

Um eine Grössenordnung der benötigten Menge an Wasserstoff zur Überbrückung von kurzfristigen Versorgungsengpässen zu bekommen, wurden innerhalb einer Extrempériode des Winterdienstes des GE-VI die Treibstoffverbräuche aller 3-Achser betrachtet. Als Datengrundlage dienten Verbrauchsdaten im Zeitraum vom 13. – 15. Januar 2021, einer Periode mit intensivem Schneefall. Davon ausgehend wurden in Abhängigkeit der Standorte der Energiebedarf aller 3-Achser ermittelt und daraus die erforderliche Menge Wasserstoff abgeleitet. In Abschnitt 3 wurde, basierend auf dem PV-Potenzial der Werkhöfe und unter Annahme einer 75%igen Flächennutzung durch Solarzellen, das Potenzial zur H2-Produktion auf insgesamt 48 t geschätzt. Somit könnten auf allen Werkhöfen des GE-VI im Jahr ungefähr 40-mal so viel Wasserstoff produziert werden, wie nötig wären, um den Strombedarf der 3-Achser-Flotte innerhalb von 3 Tagen hartem Winterdienst abdecken zu können.

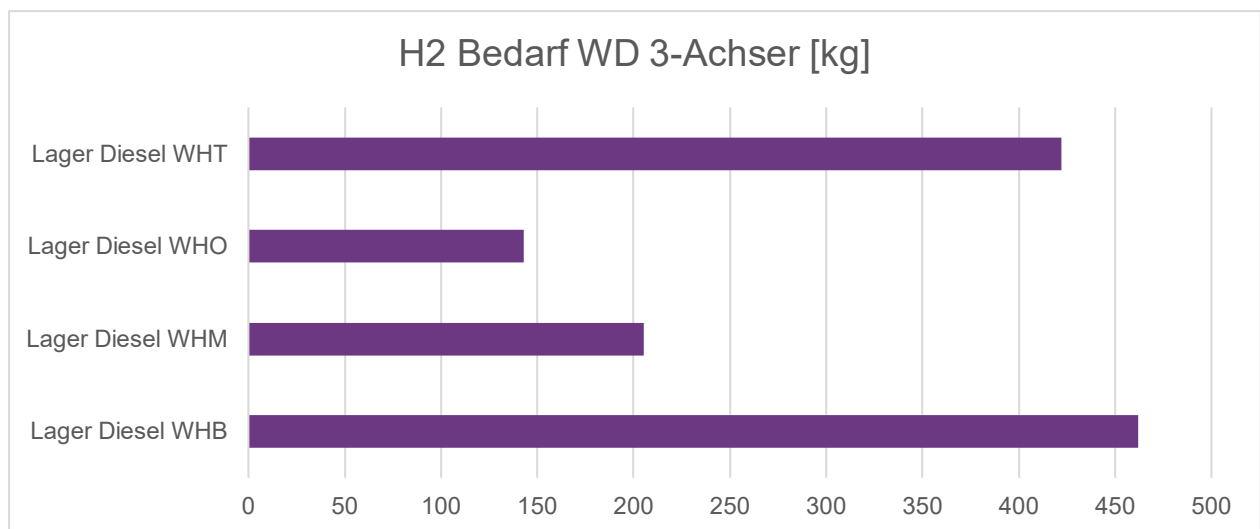


Abbildung 15: H2-Bedarf der 3-Achser für 3 Extremtage im Winterdienst

Angesichts der Unsicherheit bei der Abschätzung von Strommangellagen gestaltet es sich schwierig, genaue Wahrscheinlichkeiten für Risikobetrachtungen festzulegen. Nichtsdestotrotz kann durch die Betrachtung verschiedener kritischer Szenarien ein Eindruck gewonnen werden, ob es gerechtfertigt ist, die Verkehrstauglichkeit bei Schneefall und Strommangel zu gewährleisten. Unter Berücksichtigung der vorliegenden Analyse handelt es sich um eine erweiterte Betrachtung des Autarkiegrads. Die zuvor vorgestellte Betrachtung ermöglicht eine Abschätzung des Energiebedarfs zur Überbrückung einer dreitägigen Extremsituation, wie sie im Winter 2021 auftrat. Unter normalen Bedingungen würde der

Energievorrat der 3-Achser selbstverständlich für längere Zeiträume ausreichen. Um jedoch belastbare quantitative Aussagen zu treffen, wäre eine eingehendere Untersuchung und Analyse der Situation mittels geeigneter Simulationsverfahren erforderlich.

5. Klimawirksamkeit der Flottenerneuerung

Im Rahmen dieser Studie wurde das Potential der CO₂ Einsparungen durch eine etwaige Flottenerneuerung bis 2050 betrachtet. Ziel dieses Arbeitspaketes war die Einschätzung der tatsächlichen Effektivität der Einsparungen des GE-VI-Flottenwechsels auf elektrische Antriebe. Dazu wurden die Bilanzierungsmodelle «Carculator» des Paul Scherrer Instituts (PSI) verwendet. Während für Pkw und Kleintransporter «Carculator Online» Version 1.3 verwendet wurde, wurden die Berechnung für die Lkws offline mit dem «Carculator Truck» Version 0.3.9 gemacht. Romain Sacchi vom PSI hat mit Wissen zum Modell und allgemeiner Modellierung von Fahrzeugen tatkräftig unterstützt.

5.1 Weisung und Vergleichsbasis

Um die Ergebnisse der Umstellung der Flotte zu bewerten, ist ein Basiswert gefordert. Gemäss der Weisung des ASTRA in Abbildung 17 ist der operativ ausgestossene CO₂ per 2040 komplett zu reduzieren. Dieser Verlauf dient als Grundlage, um einzuschätzen, ob der Umstieg der Flotte auf andere Antriebsstränge tatsächlichen Effekt auf das Klima hat.

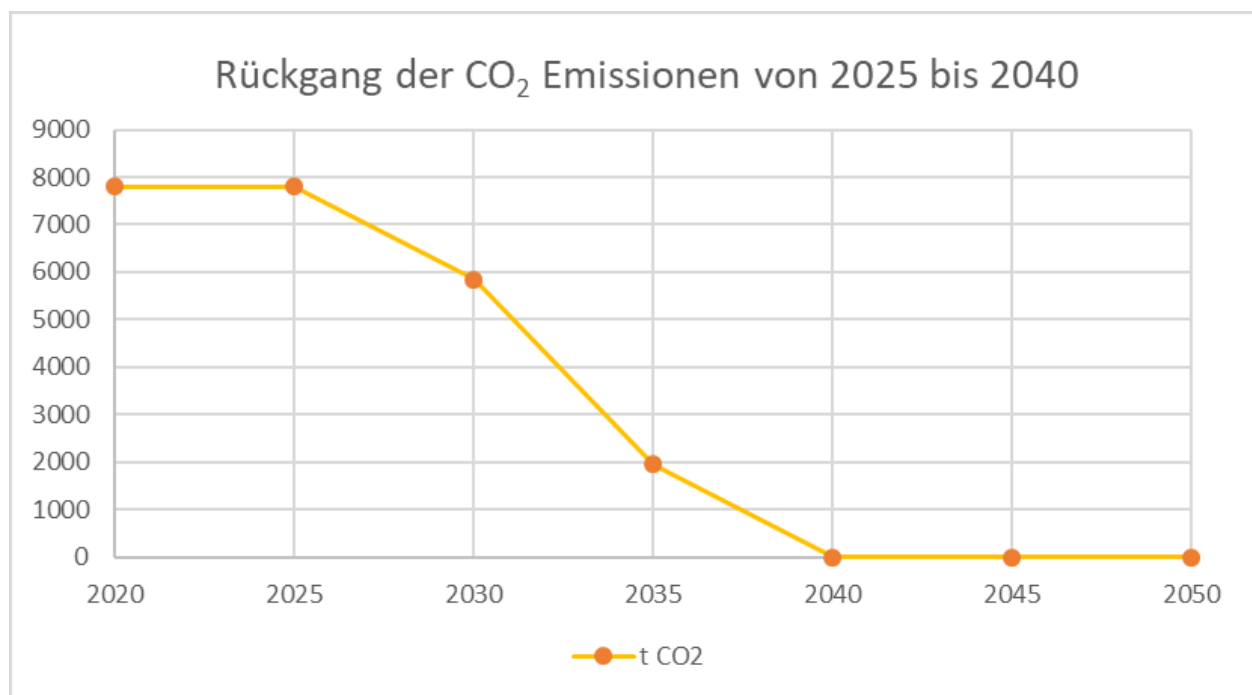


Abbildung 16: CO₂ Weisung des ASTRA für alle Gebietseinheiten (Diesel = 2.6kg CO₂/l)

In dieser Weisung gemäss Abbildung 17 schätzt das ASTRA den Verbrauch aller Gebietseinheiten auf rund drei Millionen Liter Diesel ein. Dies beinhaltet Arbeitsaufträge dritter. In diesem Projekt wurde der Fokus die Gebietseinheit VI gelegt. Damit ein fassbarer Vergleich geschaffen werden kann, wird die Weisung als Grundlage genommen und auf die Gebietseinheit VI heruntergebrochen. Die Telematik Daten aus dem Jahr 2021 vorhergehenden Kapiteln dienen der Flottenberechnung als Grundlage. Dieses Jahr sei gemäss Gebietseinheit VI das Repräsentativste.

Bei genauerer Betrachtung der Daten fällt auf, dass für die Aufgaben von Dritten keine Betankungsdaten vorhanden sind. Daher müssen diese aus der originalen Grafik herausgerechnet werden. Zur besseren Darstellung wurden für jeden Schritt der Berechnung die gleichen Farben verwendet.

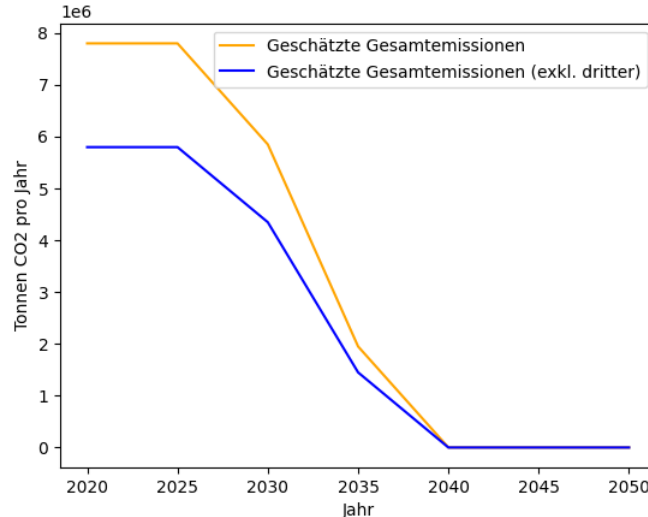


Abbildung 17: Gesamtemissionen aus der Weisung des ASTRA für alle Gebietseinheiten, orange: inklusive Aufgaben dritter (gleiche Daten wie in Abbildung 17); blau: exkl. Arbeit dritter.

Für alle Gebietseinheiten betragen gemäss Abbildung 17 die Emissionen mit Aufgaben dritter bei 7800t CO2 pro Jahr und die Emissionen ohne Dritte bei 5800t CO2 pro Jahr beginnen. Als nächstes wird in Abbildung 19 die Schätzung aus der Weisung auf GE-VI heruntergebrochen und mit den tatsächlichen CO2 Emissionen berechnet aus den Telematikdaten verglichen. Diesel und Benzin werden als gleichwertig behandelt und mit einem CO2 Emissionsfaktor von 2.67 kg /l verrechnet.

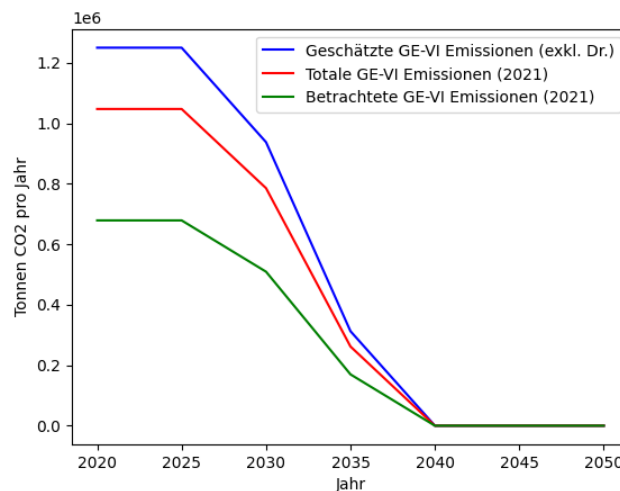


Abbildung 18: CO2 Emissionen für GE-VI, Vergleich der Schätzung aus der Weisung mit den Telematikdaten. Blau: Emissionen aus der Weisung für GE-VI exkl. Dritter; rot: Gesamtemissionen aller vorhandenen Telematikdaten für GE-VI; grün: Im Calculator betrachtete Emissionen

Die geschätzten Gesamtemissionen exklusive Dritter gemäss Weisung betragen 1.25 t CO2 pro Jahr (blau), während die Gesamtemissionen basierend auf den Telematikdaten 1.05 t CO2 pro Jahr (orange) betragen. Die Genauigkeit beträgt 84 %. Diese Abweichung ist nicht optimal, aber im akzeptablen Bereich. Woher diese Abweichung kommt, konnte nicht erörtert werden. Es scheint, dass entweder in den Telematikdaten Fahrzeuge fehlen oder die Daten des ASTRA zu hoch angesetzt sind.

In den Telematikdaten in Abbildung 19 (rot) liegen alle Fahrzeugkategorien gemäss Kapitel 2 «Analyse Fuhrpark» vor. Es war ohne immensen Aufwand oder verzerrende Vereinfachungen nicht möglich, für alle Kategorien eine passende Abbildung im Carculator zu finden. Daher wurde entschieden, nur die zugänglichsten Fahrzeugkategorien und deren Emissionswerte zu betrachten. Die Kategorien sind

- Pkw,
- Kleintransporter, Busse
- Lkw

Damit starten die in der Flottenanalyse betrachteten Emissionen (grün) für Gebietseinheit VI bei 679 t CO₂ pro Jahr. Damit betrachten wir etwa 65 % der anfallenden Emissionen. Die restlichen 35 % sind der verbleibende Gerätepark, welche sich durch ihre spezifische Tätigkeit in der jetzigen Version des Simulators nicht abbilden liessen.

5.2 Flottenmodellierung

Mit dem Carculator wurden für die bestehenden Fahrzeuge die Emissionswerte pro gefahrenem Kilometer errechnet. Diese dienen als Input für das Modell. Zusätzlich wurde gemäss der Weisung ein Beschaffungsplan erstellt. Diese Annahmen sind im Anhang zu finden. Aus der Umstellung der Flotte und deren gefahrene Kilometer ergeben sich die zu erwartenden CO₂ Reduktionen. In der ASTRA Weisung ist eine operative CO₂ Reduktion geplant. Das Klima wird jedoch auch von der Herstellung von Batterien beeinflusst. Um einen faireren Vergleich zu ziehen, wurde in einem zweiten Schritt ein Life Cycle Assessment (LCA) angefertigt.

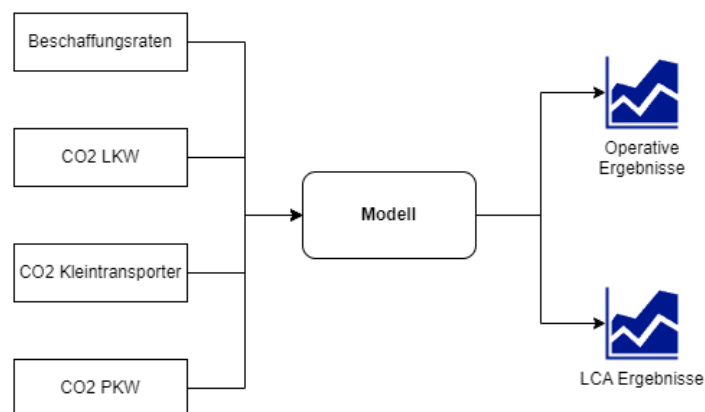


Abbildung 19: Prinzipskizze zur Flottensimulation

Bei den betrachteten Antriebssträngen wurden der Verbrenner und batterieelektrische Lösungen gewählt. Wie zuvor beschrieben sind weder Biomethan noch Wasserstoff sind in naher Zukunft erhältliche Lösungen. Siehe Kapitel 1.2, 1.3 und 2 für ausführliche Begründungen.

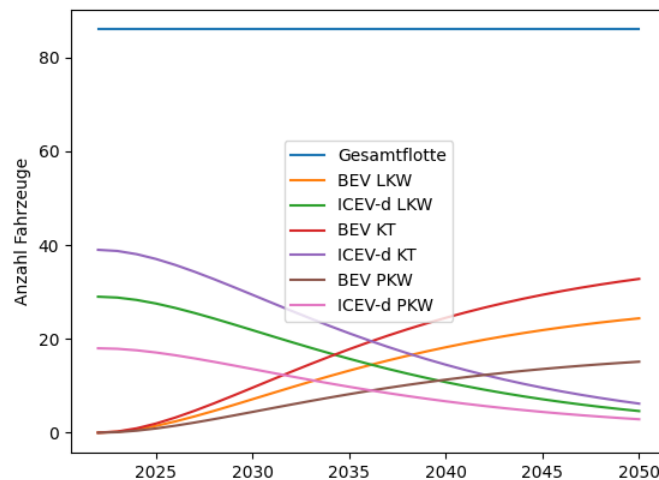


Abbildung 20: GE-VI Flottenprognose bei Umstellung auf BEV. Legende Batterieelektrisch (BEV), Lastkraftwagen (LKW), Verbrennungsmotor Diesel (ICEV-d), Kleintransporter und Busse (KT), Personenkraftwagen (PKW)

Die Flottenprognose wurde mithilfe eines Ersatzszenarios gemacht. In diesem Szenario gehen wir davon aus, dass Fahrzeuge nach ihrer normalen Lebensdauer (12 Jahre) ersetzt werden, und in einem steigenden Verhältnis der Anteil BEV an den Neubeschaffungen erhöht werden. Die Abweichungen des Totals von 86 Fahrzeugen ist auf die Ganzzahlige Betrachtung zurückzuführen, und kann vernachlässigt werden.

Mit dieser Flottenprognose und unter Annahme, dass immer ein Verbrenner ausgemustert wird, wenn ein batterieelektrisches Fahrzeug gekauft wird, entsteht Abbildung 21. Gleichet man diese prognostizierte Flotte mit den operativen Emissionen aus dem Calculator ab, ergibt sich folgende Abbildung 22:

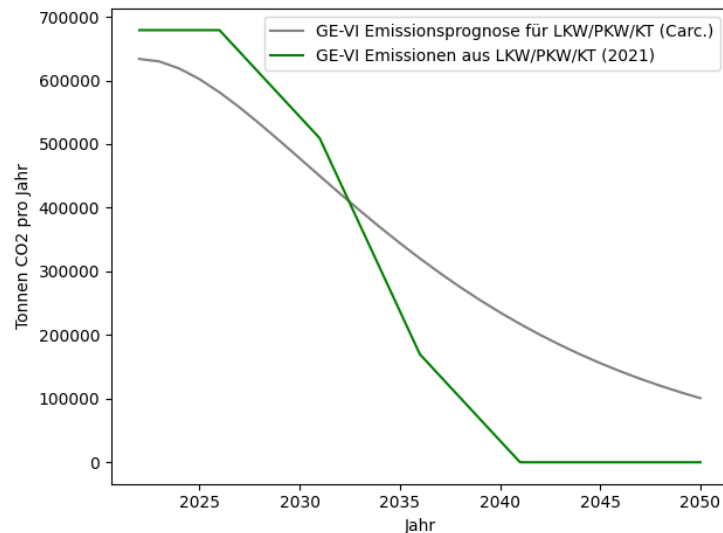


Abbildung 21: Vergleich der Emissionsprognose aus dem Calculator mit den Emissionswerten aus den Telematikdaten von GE-VI. Grün: Emissionen den Fuhrparks gemäss Telematikdaten; grau: modellierte CO2 Prognose

Die geschätzten Emissionswerte starten bei ca. 680t CO₂ pro Jahr, während das Modell bei 634t CO₂ pro Jahr beginnt. Im Jahr 2050 würden operativ noch ca. 100t CO₂ pro Jahr ausgestossen werden. Dies entspricht einer Reduktion von 85 %.

Die Resultate des Modells ergeben eine Genauigkeit von 93 %. Dies ist für die vielen getroffenen Annahmen eine hohe Genauigkeit und bestätigt die Annahmen. Damit untermauert das Modell und eine Prognose zur Validierung der ASTRA Weisung.

Es wird ersichtlich, dass der Umstieg von ICEV-d auf BEV operativ einen starken Einfluss auf den CO₂ Ausstoss von GE-VI hat. Es ist jedoch nicht möglich, mit der angenommenen Flottenumstellung alle CO₂ Emissionen zu reduzieren. Dies liegt zum einen daran, dass Verbrenner noch bis zum Schluss benutzt werden, zum anderen könnte die Flottenumstellung zu langsam erfolgen. Die Ausnutzung der Lebensdauer der Verbrenner macht Sinn, weil eine Neuanschaffung auch CO₂ kosten würde. Des Weiteren bleiben bis 2050 noch Verbrenner im Einsatz und verursachen operative Emissionen.

Ein genaueres Bild zum tatsächlichen Einfluss aufs Klima zeigt sich, wenn man auch die Daten für die Herstellung der Fahrzeuge mit einbezieht. Dies ist aufwändiger, jedoch für einen Vergleich mit Batteriefahrzeugen unbedingt nötig. Der Grossteil der Emissionen bei Batteriefahrzeugen fällt bei der Produktion, nicht bei operativen Emissionen an. Der Calculator ist für diesen Anwendungsfall ausgelegt und generiert pro Fahrzeug die jeweiligen Emissionskennwerte. Lkws, egal ob Verbrenner oder Batterie machen gemäss Abbildung 23 wie erwartet den grössten Teil der Emissionen aus.

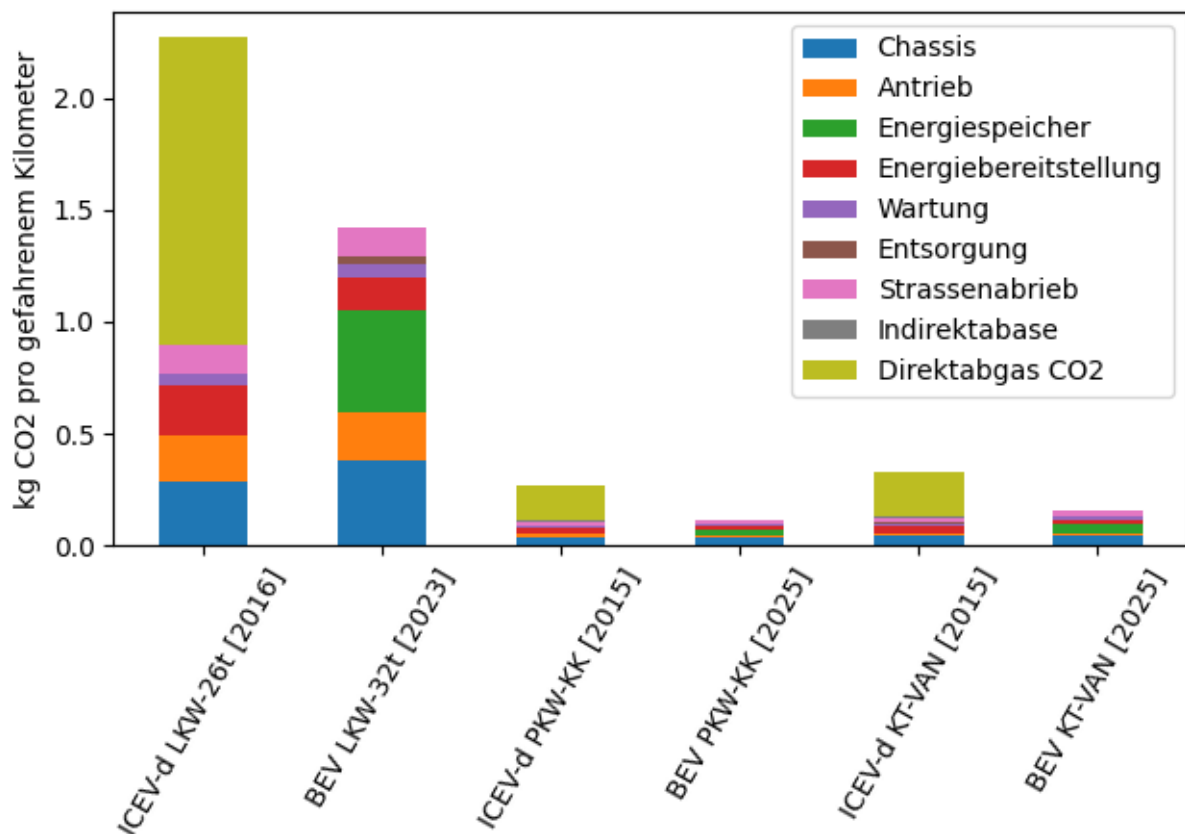


Abbildung 22: Emissionsfaktoren einzelner Teile eines Fahrzeugs der LCA als Grundlage für die Flottenprognose, aus Calculator

Für die operative Einschätzung wurden nur die Direktabgase (gelb) betrachtet. Für eine Klimaaanalyse gehören Faktoren wie z.B. Energiespeicher auch dazu. Im Calculator sind diese Punkte auch auf den gefahrenen Kilometer heruntergerechnet.

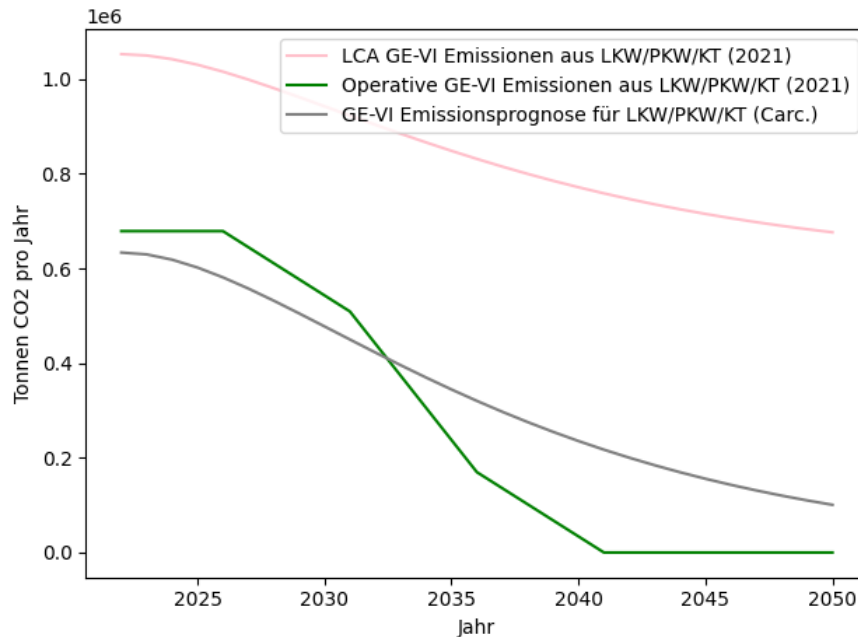


Abbildung 23: Vergleich operativen Emissionen (geschätzt und Telematik) mit den modellierten, tatsächlich klimaeffektiven Emissionen

Wie erwartet sind die CO₂ Emissionen basierend auf allen Emissionsfaktoren höher ausfällt. Während die operative CO₂ Emissionskurve bei 634t pro Jahr beginnt, startet die LCA-Emissionskurve bei 1005t pro Jahr. Im Jahr 2050 endet die Kurve bei 670t pro Jahr, was einer Absenkung von 33 % entspricht. Verglichen mit den 85 % der operativen Einsparung kann gemäss Modell nur 33 % des anfallenden CO₂ Klimawirksam bei einer Umstellung auf eine batterieelektrische Flotte reduziert werden.

5.3 Betrachtung alternativer Flottenersatzszenarien

Im folgenden Unterkapitel werden verschiedene Ersatzszenarien für die Flottendekarbonisierung betrachtet, wobei bisher ein durchschnittliches Szenario angenommen wurde, bei dem der Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV) an den Neubeschaffungen bis zum Jahr 2045 von 20% auf 100% ansteigt. Im nächsten Schritt werden zwei alternative Szenarien verglichen, die unterschiedliche Geschwindigkeiten des Flottenersatzes aufweisen: Ein schnelleres und ein langsames Ersatzszenario. Die Abbildungen zeigen zwei unterschiedlich schnell steigende Anteile der BEV an Neubeschaffungen und ermöglichen es, den jeweiligen Effekt auf die CO₂-Emissionen zu analysieren. Durch diese Betrachtung wird hervorgehoben, welchen Effekt die unterschiedlichen Ersatzraten auf die jährlichen CO₂-Emissionen, sowie auf die akkumulierten CO₂-Emissionen haben. Dadurch können die Auswirkungen der verschiedenen Ersatzszenarien auf die Gesamtstrategie der Dekarbonisierung des Betriebs der Nutzfahrzeugflotte besser verstanden werden.

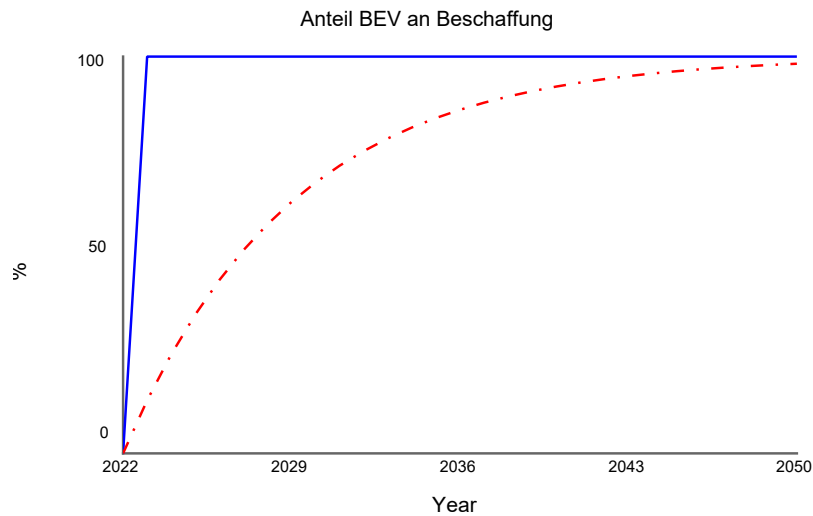


Abbildung 24: Ersatzszenarien für den Flottenersatz

Abbildung 25 zeigt zwei unterschiedliche Verläufe für den Ersatz von abgeschrieben Fahrzeugen. Der wesentliche Unterschied liegt in der Geschwindigkeit, in welcher der Anteil BEV an Neuanschaffungen auf 100% steigt. Die Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen des Betriebs werden nachfolgend gezeigt.

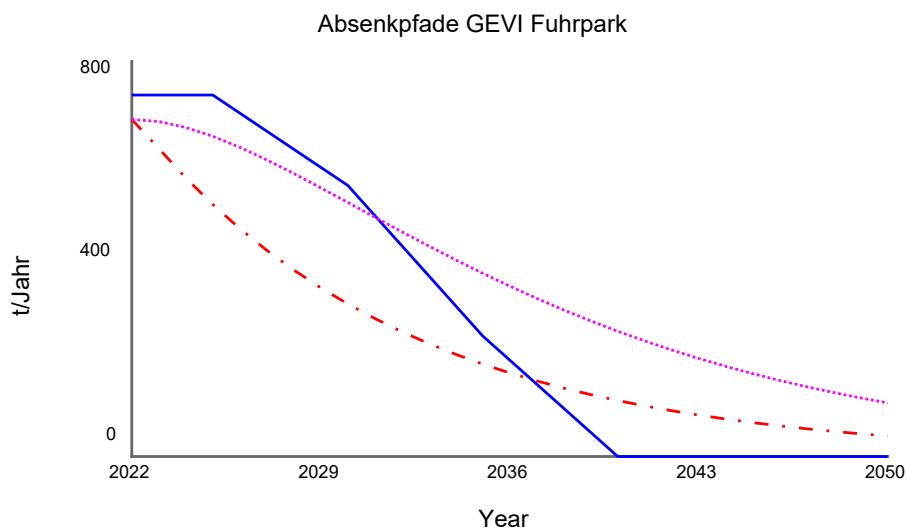


Abbildung 25: Vergleich der Ersatzszenarien mit der ASTRA Weisung

Bei der Analyse der akkumulierten Emissionen wird deutlich, dass das Szenario "Schnell_nur Betrieb" zu einer signifikanten Reduktion der CO₂-Emissionen führt und sich dabei unterhalb der von der ASTRA vorgegebenen Gesamtmenge bewegt.

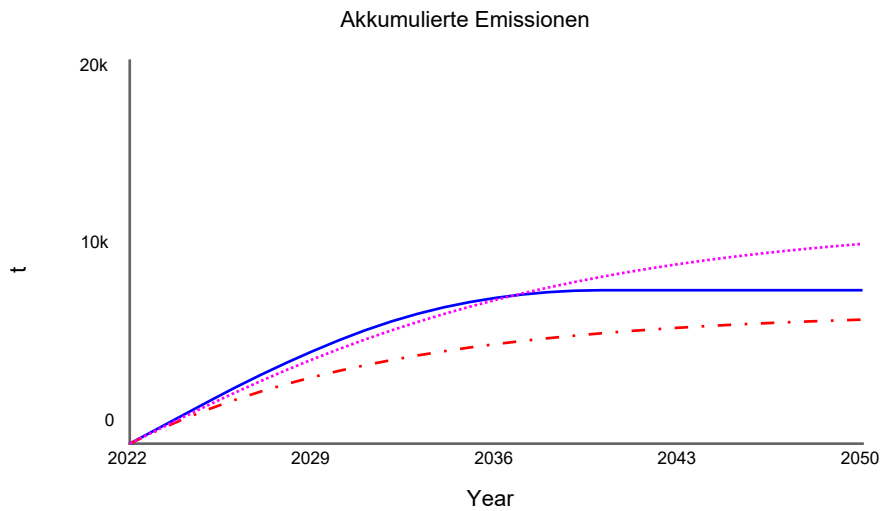


Abbildung 26: Vergleich der akkumulierten Emissionen

Obwohl eine vollständige Dekarbonisierung innerhalb der festgelegten Zeit möglicherweise nicht erreichbar ist, zeigt sich, dass ein schneller Wechsel zu einer emissionsarmen Flotte ökologisch sinnvoll ist. Ein schneller Ersatz der Fahrzeuge führt zu einer früheren Reduzierung der CO₂-Emissionen und ermöglicht insgesamt eine grössere Verringerung der Umweltauswirkungen. Zusätzlich dazu könnten weitere Aspekte wie die langfristigen Kosteneinsparungen durch geringere Wartungs- und Betriebskosten von Elektrofahrzeugen sowie die positive Wirkung auf das Image und die Nachhaltigkeitsziele des ASTRA hervorgehoben werden.

6. Zusammenfassung

Die Analyse der CO₂-Einsparungen durch eine mögliche Flottenerneuerung bis 2050 zeigt, dass ein schneller Wechsel zu batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV), im Blick auf die betrieblichen Emissionen, ökologisch sinnvoll ist. Im Ersatzszenario des schnellen Umstiegs auf Batterieelektrische Beschaffung, führt dies zu einer signifikanten Reduktion der CO₂-Emissionen und unterbietet die durch das ASTRA vorgegebene Gesamtmenge. Obwohl eine vollständige Dekarbonisierung möglicherweise nicht erreichbar ist, ermöglicht ein schneller Ersatz eine grössere Verringerung der Umweltauswirkungen im Vergleich zu einem langsamen Ersatzszenario. Mit der kompletten Umstellung dieser Fahrzeuge können operativ 85 % und unter Einbezug der Lebenszyklusemissionen 33 % des jährlich anfallenden CO₂ eingespart werden. Ob damit die Weisung eingehalten werden kann, hängt stark von der Geschwindigkeit der Flottenumrüstung zusammen.

Die ASTRA Weisung "UMSETZUNG ENERGIESTRATEGIE 2050 IM BETRIEBLICHEN UNTERHALT" und auch die Netto Null Strategie des Bundes für den Verkehr beschäftigen sich ausschliesslich mit operativem CO₂. Dem Bund ist jedoch bewusst, dass Analysen im Verkehrsbereich häufig nur die operativen Emissionen betrachten und es langfristig das Ziel sein muss, den gesamten Lebenszyklus zu berücksichtigen. Auf europäischer Ebene wird derzeit der Einbezug von Lebenszyklusemissionen in die Flottenemissionsregulierung geprüft. Ein entsprechender Vorschlag zur Erfassung dieser Emissionen soll gegebenenfalls bis Ende 2023 von der Europäischen Kommission vorliegen. Da sich der Bund an den europäischen Richtlinien orientiert, ist eine Überarbeitung der Weisung zu erwarten. UFAM (2023)

Die technische Machbarkeit der Elektromobilität wurde ebenfalls untersucht. Der Vergleich von zwei Ausstattungsvarianten (750 & 1'000 kWh) im Winterdienstinsatz zeigt, dass ein worst-case Szenario durch entsprechende Anpassung der Stand- und Ladezeiten abgedeckt werden kann. Für den Ausbau der Elektrofahrzeugflotte ist jedoch eine Überprüfung der Netzanschlusskapazitäten und eine Anpassung der Infrastruktur erforderlich, um den wachsenden Anforderungen gerecht zu werden.

Zusammenfassend kann Elektromobilität als vielversprechende Lösung zur Dekarbonisierung operativer Emissionen von Nutzfahrzeugflotten betrachtet werden. Batterieelektrische Fahrzeuge werden voraussichtlich die dominierende Technologie in der Automobilindustrie sein. Dennoch bestehen noch Herausforderungen wie die begrenzte Verfügbarkeit von Hochleistungsladestationen und die Integration der Ladeinfrastruktur in das Energiesystem. Eine umfassende Planung und Weiterentwicklung der Infrastruktur sind entscheidend, um den Erfolg der Elektromobilität im Nutzfahrzeugsektor zu gewährleisten und die damit verbundenen Vorteile hinsichtlich CO₂-Einsparungen und Gesamtbetriebskosten zu realisieren.

Fahrzeugkategorie	Neue Antriebstechnologie	Einführungszeitpunkt
PKW	BEV	2023
Kleintransporter, Busse	BEV	2024
LKW	BEV	TBD – Keine Serienprodukte verfügbar

ANHANG

Annahmen und Daten für die GE-VI Carculator Berechnungen Alle Annahmen basieren auf den Telematikdaten von GE-VI.

Pkw Flotte (für online Carculator)

	Ford Kuga	Skoda Yeti	Skoda Karoq	Peugot Expert	VW Caddy
Klasse	Kompaktklasse	Kompaktklasse	Mittelklasse	VAN	VAN
Anzahl	2	3	3	5	8
Betrachtete Baujahre	2015, 2025	2015, 2025	2015, 2025	2015, 2025	2015, 2025
Lebensdauer (km)	200'000	200'000	200'000	200'000	200'000
Jährliche Strecke (km/y)	12000	12000	12000	12000	12000
Ø Ladegewicht (kg)	50	50	50	50	50
Ø Anzahl Personen	2	2	2	2	2
Fahrzyklus	WLTC	WLTC	WLTC	WLTC	WLTC

Kleintransporter (für online Carculator)

- Da im Carculator keine Kleinbusse hinterlegt waren, wurden Faktoren zu den Hochrechnungen der Pkw Daten genommen. Ein Van wurde mit folgenden Annahmen simuliert.

	Mercedes Benz	Skoda Yeti
Klasse	Kompaktklasse	Kompaktklasse
Anzahl	33	6
Betrachtete Baujahre	2015, 2025	2015, 2025
Lebensdauer (km)	200'000	200'000
Jährliche Strecke (km/y)	25000	25000
Ø Ladegewicht (kg)	200	200
Ø Anzahl Personen	3	3
Fahrzyklus	WLTC	WLTC
Hochrechnungsfaktor	1.1	1.4

Lkw Flotte (für offline Calculator)

	Volvo FM 460 6X4 (Diesel)	DW E- Truck 32E (BEV)
Betrachtete Baujahre	2016	2025
Durchschnittliches Ladegewicht (t)	3	3
Gewicht vollgeladen (t)	26	32
Leergewicht (t)	14	20
Jährliche Strecke (km/y)	10861	10861
Motorleistung (kW)	338	500
Erwartete Lebensdauer (km)	184634	108608
Batteriekapazität (kWh)	n/a	750

Beschaffungsplan anfügen?

Ersatzraten Flotte – mittlere Geschwindigkeit.

Jahr	Gesamtflotte	BEV LKW	ICEV-d LKW	BEV KT	ICEV-d KT	BEV PKW	ICEV-d PKW
2022	86	-	29.00	-	39.00	-	18.00
2023	86	0.18	28.82	0.24	38.76	0.11	17.89
2024	86	0.69	28.31	0.93	38.07	0.43	17.57
2025	86	1.45	27.55	1.95	37.05	0.90	17.10
2026	86	2.40	26.60	3.23	35.77	1.49	16.51
2027	86	3.48	25.52	4.68	34.32	2.16	15.84
2028	86	4.65	24.35	6.26	32.74	2.89	15.11
2029	86	5.88	23.12	7.91	31.09	3.65	14.35
2030	86	7.14	21.86	9.61	29.39	4.43	13.57
2031	86	8.41	20.59	11.31	27.69	5.22	12.78
2032	86	9.66	19.34	12.99	26.01	6.00	12.00
2033	86	10.89	18.11	14.65	24.35	6.76	11.24
2034	86	12.09	16.91	16.25	22.75	7.50	10.50
2035	86	13.24	15.76	17.80	21.20	8.22	9.78
2036	86	14.34	14.66	19.29	19.71	8.90	9.10
2037	86	15.39	13.61	20.70	18.30	9.56	8.44
2038	86	16.39	12.61	22.05	16.95	10.17	7.83
2039	86	17.34	11.66	23.31	15.69	10.76	7.24
2040	86	18.22	10.78	24.51	14.49	11.31	6.69
2041	86	19.06	9.94	25.63	13.37	11.83	6.17
2042	86	19.84	9.16	26.68	12.32	12.31	5.69
2043	86	20.56	8.44	27.66	11.34	12.76	5.24

2044	86	21.24	7.76	28.57	10.43	13.18	4.82
2045	86	21.87	7.13	29.41	9.59	13.58	4.42
2046	86	22.46	6.54	30.20	8.80	13.94	4.06
2047	86	23.00	6.00	30.93	8.07	14.28	3.72
2048	86	23.50	5.50	31.60	7.40	14.59	3.41
2049	86	23.96	5.04	32.23	6.77	14.87	3.13
2050	86	24.39	4.61	32.80	6.20	15.14	2.86

E-Transporter

Tabelle: Datenbank für klimaneutrale Nutzfahrzeuge (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2023a)

Fahrzeug	Fahrzeugtyp	Batteriekapazität [kWh]	Reichweite (WLTP) [km]	Zuladung [kg]	Verfügbarkeit
ALKE ATX 340	Transporter, Flughafenfahrzeug, Pritschenwagen, Sattelzieher	10 20	Bis zu 119	1065 bis 1630 je nach Ausführung	Serienmodell
Ari Motors Ari 901	Transporter, Kastenwagen, Kipper, Kofferaufbau, Pritschenwagen	40	Bis zu 260	885 900 910 916	Serienmodell
Citroën ë-Jumpy	Transporter, Kastenwagen,	50 75	50 kWh: 230 75 kWh: 330	Bis zu 1275	Serienmodell
EVUM aCar	Transporter, Kipper, Kofferaufbau, Plattform/individuell, Pritsche & Spriegel, Pritschenwagen	16.5 33 mit n-paket	Bis zu 110 Bis zu 200 mit Reichweite n-paket	Bis zu 1000	Serienmodell
Fiat E-Ducato	Transporter, Kastenwagen, Plattform/individuell	47 79	N1 79 kWh: 260 bis 283 N2 79 kWh: 237 bis 260	N1 79 kWh: 690 bis 845 N2 79 kWh: 1440 bis 1595	Serienmodell
Ford E-Transit	Transporter Kastenwagen Lkw, Doppelkabine Lkw, Fahrgestell/ Pritschwagen Einzelkabine	68	Bis zu 317	1600 / 1900	Serie
Goupil G4	Transporter, Kipper, Kofferaufbau, Plattform/individuell, Pritschenwagen	13.8	Bis zu 120	Max. 1200	Serienmodell
Goupil G6	Transporter, Kipper, Kofferaufbau, Plattform/individuell, Pritschenwagen	28.8	Bis zu 150	Max. 1150	Serienmodell
KAIYUN MOTORS Pickman	Transporter, Kasten, Pick Up	7.2	120	Cargo: 550 Classic: 600	Serie
MAN eTGE	Transporter, Kastenwagen	35.8	Bis zu 115	Max. 982	Serienmodell
Fahrzeug	Fahrzeugtyp	Batteriekapazität [kWh]	Reichweite (WLTP) [km]	Zuladung [kg]	Verfügbarkeit

			[km]		
MAXUS eDeliver 3	Transporter, Fahrgestell langer Radstand, Kastenwagen kurzer Radstand, langer Radstand	50	Max. 238	Max. 1045 Fahrgestell Max. 855 Kastenwagen	Serienmodell
MAXUS eDELIVER 9	Transporter, 88.55 kWh: Kastenwagen / zwei Radstände und zwei Aufbauhöhen	N1 mit 88.55 N2 mit 88.55	88.55 kWh: bis zu 296	N1 mit 88.55 kWh: Max. 860 N2 mit 88.55 kWh: max. 1350	Serienmodell
Mercedes eSprinter	Transporter, Kastenwagen	35 47	35 kWh: bis zu 120 47 kWh: Bis zu 169	35 kWh: max. 1001 47 kWh: max. 849	Serienmodell
Mercedes eVito	Transporter, Kastenwagen, Kleinbus	41.4	Bis zu 186	Max. 1015	Serienmodell
Nissan e-NV200	Transporter, Kastenwagen, Kleinbus	40	Bis zu 275	Max. 667	Serienmodell
Opel Combo-e Cargo	Transporter, Kastenwagen	50	Bis zu 275	Max. 800 kg	Serie
Opel Vivaro-e	Transporter, Kastenwagen	50 75	50 kWh: bis zu 231 75 kWh: bis zu 329	50 kWh: max. 1199 kg 75 kWh max. 929 kg	Serienmodell
Peugeot e-Boxer	Transporter, Kastenwagen, Plattform/individuell	37 70	37 kWh: bis zu 200 70 kWh: bis zu 340	37 kWh: bis zu 1932 kg 70 kWh: bis zu 2172 kg	Serienmodell
Peugeot e-Expert	Transporter, Kastenwagen	50 75	50 kWh: bis zu 230 75 kWh: bis zu 282	50 kWh: bis zu 1199 kg 75 kWh: bis zu 927 kg	Serienmodell
Peugeot e-Partner	Transporter, Kastenwagen	50	Bis zu 280	Max. 750 kg	Serienmodell
QUANTRON QARGO 4EV	Transporter, Koffer mit/ohne Ladebordwand, Pritsche mit Plane/Ladebordwand	81	Bis zu 230	1600 kg	Verfügbar
QUANTRON QLI BEV	Transporter, Kipper, Koffer mit/ohne Ladebordwand, Pritsche mit Plane/Ladebordwand, Van	115 74	Bis zu 180	Abhängig von Typ und Aufbau	Verfügbar

Fahrzeug	Fahrzeugtyp	Batteriekapazität [kWh]	Reichweite (WLTP) [km]	Zuladung [kg]	Verfügbarkeit
RENAULT Kangoo Rapid E-Tech	Transporter	33	Bis zu 270	k. A.	Serie
Renault Master Z.E.	Transporter	33	Bis zu 200	k. A.	Serienmodell
Streetscooter WORK Performance	Transporter	43.4	Bis zu 161	Max. 1014 kg	Serienmodell
Toyota Proace Electric	Transporter, Kastenwagen	50 70	50 kWh: bis zu 230 70 kWh: bis zu 330	50 kWh: max. 1275 kg 70 kWh: max. 1000 kg	Serienmodell
Volkswagen Nutzfahrzeuge e-Crafter	Transporter, Kastenwagen	35.8	Bis zu 115	N1: max. 980 kg N2: max. 1720 kg	Serienmodell

E-Lkw

Tabelle: Datenbank für Klimaneutrale Nutzfahrzeuge (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2023a)

Fahrzeug	Fahrzeugtyp	Batteriekapazität [kWh]	Reichweite (WLTP) [km]	Zuladung [t]	Verfügbarkeit
BPW Bax	Lkw, Chassis	126 84	Bis zu 200	4.25	Serie
DAF CF Electric	Lkw, Sattelzugmaschine	Bis zu 350	Lkw: bis zu 220 SZM: bis zu 250	Lkw: ca. 18.8 SZM: ca. 28	Kleinserie
DAF LF Electric	Lkw, 4x2	Bis zu 282	Bis zu 280	Bis zu 11.7	Kleinserie
FOTON F18.280 T	Lkw, Transporter	280	Bis zu 350	11	Serie
FOTON F6.80T	Lkw, Transporter	80	200	3.5	Serie
FRAMO City-Logistik	Lkw, nach Kundenwunsch	58 - 231	Bis zu 300	Je nach Fahrzeugart	Verfügbar
FRAMO Werklogistik	Sattelzugmaschine	173 - 231	Bis zu 120	Je nach Batteriegrösse/Basisfahrzeug	Verfügbar
Fuso eCanter	Lkw	Bis zu 82.8	Bis zu 100	Bis zu 4.5	Kleinserie
FUTURICUM FH SEMI 40E	Sattelzugmaschine, 4x2T, 6x2T	680; 900	Bis zu 500	Bis 32	Kleinserie

Fahrzeug	Fahrzeugtyp	Batteriekapazität [kWh]	Reichweite (WLTP) [km]	Zuladung [kg]	Verfügbarkeit
Designwerk (ehemals FUTURICUM FM LOGISTICS) 18E (4x2R)	Lkw, 4x2R	900	500 (geschätzt)	Bis 11	Kleinserie
Designwerk (ehemals FUTURICUM FM LOGISTICS) 26E (6x2R)	Lkw, 6x2R	900	500 (geschätzt)	Bis 17.5	Kleinserie
Designwerk (ehemals FUTURICUM) FM SEMI 40E (4x2T)	Sattelzugmaschine, 4x2T	450	250 (geschätzt)	Bis 32	Kleinserie
IRIZAR ieTruck	4x2, 6x2, Abfallsammelfahrzeug, Kastenaufbau Kipplastwagen, Tankfahrzeug	130 -400 (je nach Aufbau)	Bis zu 250	10.5- 12.5	Serie
MAN eTGM	Lkw, Getränke- oder Pritschenaufbau	Bis zu 185	Bis zu 200	Ca. 12.5	Kleinserie
Mercedes eActros 300	Lkw, 315 kWh: 4x2, 6x2, 6x2 mit Anhänger, 420 kWh: 6x2	315 420	315 kWh: bis zu 300 420 kWh: bis zu 400	315 kWh: ca. 10.6 / ca. 17 / ca. 17.7 420 kWh: ca. 16.6	Kleinserie
QUANTRON QHD 50-280	Sattelzugmaschine	280	Bis zu 180	25	Verfügbar
QUANTRON	Sattelzugmaschine, QHM BEV 27-400, QHM BEV 44-400	280 – 392	QHM BEV 27-400: bis zu 350 QHM BEV 40-400: bis zu 300	Abhängig von der Ausführung	AB Q2 2023
Renault D Wide Z.E.	Lkw	Bis zu 264	Bis zu 200	k. A.	Serie
Renault D Z. E.	Lkw	Bis zu 396	Bis zu 300	k. A.	Serie
SCANIA BEV	Lkw, 4x2, 6x2, 6x2*4, L- und p-Fahrerhaus	165 297	165 kWh: bis zu 90 297 kWh: bis zu 250	Identisch zu Diesel-Varianten	Serie
VOLTA TRUCKS Zero	Lkw, Trocken- oder Kühlkoffer	248	150-200	8	Serie

Volvo Electric	FE	Lkw, 6x2, kurzes/langes/Komfort-Fahrerhaus, Niederflurfahrerhaus	Bis zu 264	Bis zu 200	k. A.	Serie
Volvo Electric	FH	Lkw, Sattelzugmaschine	450-540	Bis zu 300	23	Bestellbar 2022
Fahrzeug		Fahrzeugtyp	Batteriekapazität [kWh]	Reichweite (WLTP) [km]	Zuladung [kg]	Verfügbarkeit
Volvo Electric	FL	Lkw, Komfort-Fahrerhaus, kurzes Fahrerhaus	Bis zu 396	Bis zu 300	k. A.	Serie
Volvo Electric	FM	Lkw, Sattelzugmaschine	450-540	Bis zu 300	23	Bestellbar 2022
Volvo Electric	FMX	Lkw (Bausegment), Sattelzugmaschine	83	Bis zu 300	23	Bestellbar 2022

E-Sonderfahrzeuge

Tabelle: Datenbank für Klimaneutrale Nutzfahrzeuge (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2023a)

Fahrzeug	Fahrzeugtyp	Batteriekapazität [kWh]	Reichweite (WLTP) [km]	Zuladung [t]	Verfügbarkeit
BERGMANN C804e	Kipper, alternativ mit Drei-Seiten-Kipppritsche, Schütt- und Stückguttransporter mit Rundkipplmulde	16 24	62	Max. 3.5	Kleinserie
BOSCHUNG Pony P3.0	Multifunktionaler Geräteträger	54.4	k. A. > 10 h	N1: 1.5 N2: 2	Serie
BOSCHUNG Urban-Sweeper S2.0	Kehrfahrzeug	54.4	k. A. > 10 h	N1: 1.2 N2: 1.5	Serie
BROCK VS6 e	Kehrfahrzeug	246.8	k. A. 9 h Arbeitseinsatz	9.5	Serie
FOTON F16.250 S	Fahrgestell für Sonderfahrzeuge	246.8	300	9.5	Serie
FRAMO Bauwirtschaft	Betonmischfahrzeug, je nach Kundenwunsch andere Ausführungen	173-231	Bis zu 200	Je nach Fahrzeugart	Verfügbar
FRAMO Kommunalwirtschaft	Abfallsammelfahrzeug, je nach Kundenwunsch andere Ausführung	173-231	Bis zu 200	Je nach Fahrzeugart	Verfügbar
Designwerk (ehemals)	Abfallsammelfahrzeug, 6x2R	255 340	255 kWh: 150	Bis 19	Kleinserie

FUTURICUM) COLLECT LOW ENTRY 26E (6x2R)			340 kWh: 200 (geschätzt)		
Fahrzeug	Fahrzeugtyp	Batteriekapazität [kWh]	Reichweite (WLTP) [km]	Zuladung [kg]	Verfügbarkeit
Designwerk (ehemals FUTURICUM)FM COLLECT 26E (6x2R)	Abfallsammelfahrzeug, 6x2R	255 340 450	255 kWh: 150 340 kWh: 200 450 kWh: 250 (geschätzt)	Bis 18.5	Kleinserie
Designwerk (ehemals FUTURICUM) FM COLLECT CRANE 32E (8x2R)	Abfallsammelfahrzeug, 8x2R, Kranaufbau	255 340 450	255 kWh: 150 340 kWh: 200 450 kWh: 250 (geschätzt)	Bis 22.5	Kleinserie
Designwerk (ehemals FUTURICUM)FM SWEEPER 18E (4x2R)	Kehrfahrzeug, 2x2R	340 450	340 kWh: 200 450 kWh: 250 (geschätzt)	5 (ohne Wasser) bis 10	Kleinserie
FUTURICUM FMX CONCRETE 40E (10x4R)	Betonmischfahrzeug, 10x4R	340 450	340 kWh: 200 450 kWh: 250 (geschätzt)	Bis 22	Kleinserie
Designwerk (ehemals FUTURICUM)FMX TRIPPER 40E (10x4R)	Kipper, 10x4R	340 450	340 kWh: 200 450 kWh: 250 (geschätzt)	Bis 22	Kleinserie
QUANTRON QHB 27-200/280	Abfallsammelfahrzeug, Radstand 3450/1350 mm oder 399/1350 mm	200 280	200 kWh: bis zu 175 280 kWh: bis zu 200	11.08 Radstand 3900 mm 9.938 Radstand 3450 mm	Verfügbar
SANY 408P	Betonmischfahrzeug, 8x4, Putzmeister P 9 G iONTRON	350	200 (geschätzt)	Max. 19.5	Kleinserie
SCHMITZ Mini Kipper MK 1700E	Transporter, Hydraulischer Dreiseitenkipper 1100x1800x300 mm	15.36 mit 320 Ah bei 48 Volt	90	1.4	Kleinserie

H2-Transporter

Tabelle: Datenbank für Klimaneutrale Nutzfahrzeuge (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2023a)

Fahrzeug	Fahrzeugtyp	Tankgrösse [kg]	Reichweite (WLTP) [km]	Zuladung [kg]	Verfügbarkeit
HOLHAUSE N HyMax-75 (700 bar)	Transporter, Kastenwagen, Pritschenwagen	6	350	700	Kleinserie
HOLTHAUS EN HyMax-80 (700 bar)	Transporter, Kastenwagen, Pritschenwagen	6	300	950-2900	Kleinserie
Opel E-Vivaro Hydrogen (700 bar)	Transporter, zwei Längen 4,95 und 5.30 m	4.4	Über 400	1100	Ab Herbst 2021
Peugeot E-Expert Hydrogen (700 bar)	Transporter, zwei Längen 4.95 und 5.30 m	4.4	Über 400	1100	Ab Herbst 2021
QUANTRON QLI FCEV (350 bar)	Transporter, Kofferaufbau, Pritschenwagen	8.2	Max. 500	Abhängig vom Aufbau	Ab Q2 2023

H2-Lkw

Tabelle: Datenbank für Klimaneutrale Nutzfahrzeuge (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2023a)

Fahrzeug	Fahrzeugtyp	Tankgrösse [kg]	Reichweite (WLTP) [km]	Zuladung [t]	Verfügbarkeit
FAUN Bluepower (700bar)	Lkw, 4x2, 6x2, Abrollkipper, Absetzkipper, Getränkeaufbauten, Kranaufbau mit Pritsche, Kühlkofferaufbau, Wechselbrücke, Werkslogistik	16.1	250	k. A.	Serie
FAUN Citypower (700 bar)	Lkw, Kühlkofferaufbau, Trockenkofferaufbau, Verschiedene Planenaufbauten	32	500	9	Ende 2023
Hyundai Xcient Fuel Cell 2021 (350 bar)	Lkw, 4x2, 6x2, Kühlkofferaufbau, Trockenkoffer, Planenaufbauten	31.08	Ca. 400	k. A.	Kleinserie

Fahrzeug	Fahrzeugtyp	Tankgrösse [kg]	Reichweite (WLTP) [km]	Zuladung [t]	Verfügbarkeit
HYZON HyMax- 160 (350 bar)	Lkw, 4x2, Kastenwagen, Kühlwagen, Müllsammelfahrzeug	15-50	400	Abhängig vom gewählten Chassisgewicht	Serie
HYZON HyMax- 250/440 (350 bar)	4x2, 6x2, 6x4, Anhängertransport, Kastenwagen, Kühlwagen, Müllsammelfahrzeug	15-50	400	Abhängig vom gewählten Chassisgewicht	Serie
QUANTRON QHM FCEV (700 bar)	Sattelzugmaschine, Vier Ausführungen: 27-1000, 44-1000, 44-2000, 60-2000	k. A. Batteriekapazität 118 kWh	44-1000 und 27-1000: bis zu 700 44-2000 und 60-2000: bis zu 1500	Abhängig von der Ausführung (Typ)	44-1000 und 27-1000: Q2 2023 44-2000 und 60-2000: Q3 2023

H2-Sonderfahrzeuge

Tabelle: Datenbank für Klimaneutrale Nutzfahrzeuge (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, 2023a)

Fahrzeug	Fahrzeugtyp	Tankgrösse [kg]	Reichweite (WLTP) [km]	Zuladung [t]	Verfügbarkeit
E-TRUCKS EUROPE Fuel Cell (2021)	Abfallsammelfahrzeug, Müllsammelfahrzeug 4x2, 6x2 mit Pressaufbau	15 20 30	200	6-9	Kleinserie
FAUN Bluepower	Abfallsammelfahrzeug, Betonmischer, Kehrmaschine, 4x2, 6x2	16.1	300-400	k. A.	Serie

7. Literatur

ASTRA. ASTRA: 13001:2008, *Lüftung der Strassentunnel. Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung*. Bern: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation.

AUTO CH, 2023. *Immatrikulationen von neuen Personenwagen (CH & FL)* [online]. 27. März 2023 [Zugriff am: 27. März 2023]. Verfügbar unter:

https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fwww.auto.swiss%2Fwp-content%2Fuploads%2F2023%2F03%2FMOFISPW2023_2.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK

BFE-MAGAZIN ENERGIEIPLUS, 2023. *Elektrische Liefer- und Lastwagen: Es geht schneller, als viele denken*. [online]. 15. Februar 2023 [Zugriff am: 27. März 2023]. Verfügbar unter:

<https://energieiplus.com/2023/02/15/elektrische-liefer-und-lastwagen-es-geht-schneller-als-viele-denken/>

BUNDESAMT FÜR UMWELT, 2018. Vergleich «Totalrevision CO₂-Gesetz nach 2020» und «Pa.lv. Burkart». Bericht zuhanden der UREK-N.

BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG UND FORSCHUNG, 2022. Szenarien und regulatorische Herausforderungen für den Aufbau der Ladeinfrastruktur für elektrische Pkw und Lkw. ENSURE - Neue EnergieNetzStruktURen für die Energiewende.

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2020. Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge. mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullemissionslogistik auf der Strasse.

CHEMRRV, 18. Mai 2005. *SR 814.81 - Verordnung vom 18. Mai 2005 zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV)* [online] [Zugriff am: 28. März 2023]. Verfügbar unter: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/478/de>

COLELLA, F., 2016. Electric vehicle fires. Tunnel Safety & Security. *7th International Symposium*, 629-639. 7th International Symposium.

DEUTSCHES BIOMASSEFORSCHUNGSZENTRUM, 2022. *Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr*: DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. ISBN 978-3-946629-82-5.

EIDG. FORSCHUNGSANSTALT FÜR WALD, SCHNEE UND LANDSCHAFT, 2017.

Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung. Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET.

EU PARLAMENT, 2023. *Fit für 55: neue Pkw und leichte Nutzfahrzeuge ab 2035 emissionsfrei* [online]. 27. März 2023 [Zugriff am: 27. März 2023]. Verfügbar unter:

<https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20230210IPR74715/fit-fur-55-neue-pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge-ab-2035-emissionsfrei>

EUROPÄISCHE KOMMISSION, 14. Juli 2021. *Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/631 im Hinblick auf eine Verschärfung der CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge im Einklang mit den ehrgeizigeren Klimazielen der Union. COM(2021) 556 final* [online] [Zugriff am: 27.03.23]. Verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:870b365e-eecc-11eb-a71c-01aa75ed71a1.0015.02/DOC_1&format=PDF

HYTUNNEL, 2023. *Pre-normative research for safety of hydrogen driven vehicles and transport through tunnels and similar confined spaces*. [online]. Project No. 826193. 26. Juli 2023 [Zugriff am: 26. Juli 2023]. Verfügbar unter: https://hytunnel.net/?page_id=90

- KASHKAROV, S., M. DADASHZADEH, S. SIVARAMAN und V. MOLKOV, 2022. Quantitative Risk Assessment Methodology for Hydrogen Tank Rupture in a Tunnel Fire [online]. *Hydrogen*, **3**(4), 512-530. Hydrogen. Verfügbar unter: doi:10.3390/hydrogen3040033
- LAFLEUR, C., G. BRAN ANLEU, A. MUNA, B. EHRHART, M. BLAYLOCK und W. HOUF, 2017. *Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle Tunnel Safety Study*.
- LAM, C., 2016. Full-scale fire testing of electric and internal combustion engine vehicles. *4th International Conference on Fires in Vehicles - FIVE*, **2016**, 95-106. 4th International Conference on Fires in Vehicles - FIVE.
- LECOCQ, A., 2012. Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle. *2nd International Conference on Fires in Vehicles - FIVE*, **2012**(183-194). 2nd International Conference on Fires in Vehicles - FIVE.
- NATIONALE ORGANISATION WASSERSTOFF- UND BRENNSTOFFZELLENTechnologie, 2023a. *Fahrzeugdatenbank - Klimafreundliche Nutzfahrzeuge* [online]. 27. März 2023 [Zugriff am: 27. März 2023]. Verfügbar unter: <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/praxis/fahrzeugdatenbank/>
- NATIONALE ORGANISATION WASSERSTOFF- UND BRENNSTOFFZELLENTechnologie, 2023b. Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Strassengueterverkehr [online]. Auswertung der Cleanroom-Gespräche 2022 mit Nutzfahrzeugherstellern [Zugriff am: 27. März 2023]. Verfügbar unter: <https://www.klimafreundliche-nutzfahrzeuge.de/wp-content/uploads/2023/02/Marktentwicklung-klimafreundlicher-Technologien-im-schweren-Strassengueterverkehr.pdf>
- NATIONALE PLATTFORM ZUKUNFT DER MOBILITÄT, 2020. Werkstattbericht Antriebswechsel Nutzfahrzeuge [online]. Wege zur Dekarbonisierung schwerer LKW mit Fokus der Elektrifizierung. Arbeitsgruppe 1: Klimaschutz im Verkehr [Zugriff am: 27. März 2023]. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/201461324-Werkstattbericht-antriebswechsel-nutzfahrzeuge.html>
- UFAM, 2023. *Langfristige Klimastrategie 2050* [online]. 26. Juli 2023 [Zugriff am: 26. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/emissionsverminderung/verminderungsziele/ziel-2050/klimastrategie-2050.html>
- UMWELTBUNDESAMT, 2012. *Ökobilanzen ausgewählter Biotreibstoffe. Erstellt im Rahmen des Projekts "Biotreibstoffe - Potentiale, Risiken, Zukunftsszenarien"* [online]. Wien. Reports. REP-0360. Verfügbar unter: http://www.umweltbundesamt.at/aktuell/publikationen/publikationssuche/publikationsdetail/?pub_id=1957
- WBF, 2023. Die Massnahmen im Fall einer StromMangellage im Überblick [online]. *Faktenblatt*. Faktenblatt [Zugriff am: 20. Juli 2023]. Verfügbar unter: <https://www.newsd.admin.ch/newsd/message/attachments/75818.pdf>