Landeshauptstadt
München
Referat für Klima- und Umweltschutz

Potentiale alternativer Kraftstoffe und Antriebstechnologien

im urbanen Umfeld von Mobilität und Transport

Impressum

Herausgeberin
Landeshauptstadt München
Referat für Klima- und Umweltschutz
Bayerstr. 28a
80335 München
muenchen.de/rku

Auftragnehmer
d-fine GmbH
An der Hauptwache 7
60313 Frankfurt am Main
www.d-fine.de

Stand: 08/2022

Inhaltsverzeichnis

1 Management Summary ... 1
2 Ziel der Studie ... 3
3 Methodisches Vorgehen ... 4
3.1 Sekundäranalyse 4
3.2 Bewertungsschema 4
4 Fokus, Parameter und Annahmen ... 5
5 Analyse der Kraftstoffe ... 7
5.1 Benzin und Diesel 7
5.2 Wasserstoff 9
5.3 Gaskraftstoffe 10
5.4 Strom 12
5.5 Klimabilanzen der Kraftstoffe 13
6 Analyse der Antriebstechnologien ... 14
6.1 Verbrennungsmotor 14
6.2 Hybrid 15
6.3 Plug-In-Hybrid 15
6.4 Batterieantrieb 15
6.5 Oberleitung 15
6.6 Brennstoffzellenantrieb 16
6.7 Brennstoffzellenantrieb als Reichweitenverlängerung 16
7 Rahmen und Definitionen der Bewertung ... 17
7.1 Fahrzeugklassen 17
7.2 Definition der Einsatzszenarien 17
7.3 Definition der Bewertungskriterien 18
8 Bewertung von alternativen Kraftstoffen und Antriebstechnologien in verschiedenen Einsatzszenarien ... 22
8.1 Urbane Mobilität 22
8.2 Urbaner Transport 28
8.3 Spezialanwendungen 32
8.4 Abschließende Bewertung für die Stadt München 34
9 Ausblick ... 36
10 Verwendete Abkürzungen ... 37
10.1 Antriebstechnologien 37
10.2 Kraftstoffe 37
10.3 Moleküle 37
10.4 Sonstiges 37
11 Quellenangaben ... 38
12 Anhang ... 42

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lebenszyklus der Kraftstoffe 5
Abbildung 2: Kraftstoffübersicht - Herstellungspfade und Verwendungsmöglichkeiten 7
Abbildung 3: Steckbrief – Benzin und Diesel 9
Abbildung 4: Steckbrief – Wasserstoff 10
Abbildung 5: Steckbrief – Gaskraftstoffe 11
Abbildung 6: Steckbrief – Strom 12
Abbildung 7: Klimabilanz aller Kraftstoffe 13
Abbildung 8: Übersicht der Antriebstechnologien 14
Abbildung 9: Daten des Pkw-Bestands in München 17
Abbildung 10: Übersicht der betrachteten Einsatzszenarien 18
Abbildung 11: Übersicht der betrachteten Bewertungskriterien 19
Abbildung 12: Regulatorische Einblicke 20
Abbildung 13: Auswertung –Szenario „Innerstädtische Kurzfahrten eines Pkw der Kompaktklasse“ 23
Abbildung 14: Klimabilanz – Bus und Pkw Vergleich 25
Abbildung 15: Szenario „ÖPNV: Kleiner Umlauf eines Gelenkbusses“ 26
Abbildung 16: Szenario „Letzte Meile“ 28
Abbildung 17: Szenario „Anlieferung Handel mit einem Lkw N2“ 30
Abbildung 18: Szenarien der Spezialanwendungen 33
Abbildung 19: Betrachtete Antriebstechnologien in jeder Fahrzeugklasse 48
Abbildung 20: Klimabilanz aller Kraftstoffe (1. Quartil) 49
Abbildung 21: Klimabilanz aller Kraftstoffe (3. Quartil) 50

1 Management Summary

Der Münchener Stadtrat hat für die Landeshauptstadt das Zieldatum zum Erreichen der Klimaneutralität von 2050 auf 2035 vorgezogen. Als einer der Haupttreiber der Treibhausgasemissionen nimmt der Verkehr eine besonders wichtige Rolle in der Emissionsreduktion ein. Hier gilt es entsprechend, nachgelagert zu Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung und -verlagerung auf den Umweltverbund, durch den effizienten und wirtschaftlichen Hochlauf alternativer und klimaneutraler Antriebstechnologien das Erreichen dieser Ziele zu unterstützen. Basierend auf der Auswertung einer Vielzahl an Studien und Datenquellen, ergeben sich folgende Hauptaussagen zum Potential verschiedener alternativer Antriebsformen und Kraftstoffe in gezielten Einsatzszenarien in der Stadt München.

Elektromobilität etabliert sich

Batterieelektrische Fahrzeuge weisen nicht zuletzt wegen der besseren Klimabilanz (schon beim heutigen Strommix -40 Prozent im Vergleich zu Benzin) und der lokalen Emissionsfreiheit über sämtliche Kriterien (siehe Kapitel 7.3) hinweg gute bis sehr gute Ergebnisse auf. Ihre technische Entwicklung kommt stark voran, sie verfügen über die höchste Energieeffizienz und sind insbesondere in der urbanen Mobilität und bei leichten Nutzfahrzeugen bereits heute alltagstauglich. Doch nicht überall können sie sinnvoll eingesetzt werden. Besonders bei schweren Nutzfahrzeugen oder Bussen mit hohen Reichweiten- und Leistungsanforderungen würden beim derzeitigen Technologiestand zu große Batterien benötigt werden. Zudem ist die Verfügbarkeit bei Sondernutzfahrzeugen wie z. B. Löschfahrzeugen der Feuerwehr noch nicht gegeben. Während bei Letzteren z. B. auch Hybrid-Lösungen (Verbrenner und Strom oder auch Wasserstoff und Strom) mittelfristig Abhilfe leisten können, könnten auf der Langstrecke für den Lkw- und Busverkehr auch elektrische Oberleitungen zum Einsatz kommen.

Regulatorischer Druck

Der starke Umschwung, insbesondere auf batteriegestützte Elektromobilität im Pkw-Segment, ist zum Teil auch regulatorisch bedingt. Um die Ziele des EU Green Deals – oder sogar ambitioniertere staaten-spezifische Ziele – zu erreichen, gibt es mittlerweile Konkretisierungen hinsichtlich der Dekarbonisierungspfade. Durch die EU-Verordnung 2019/631 wird die Entwicklung von flottenweiten Emissionen für Personenkraftwagen (Pkw) und leichte Nutzfahrzeuge (LNF) geregelt und implizit schrittweise der Anteil an klassischen Verbrennerfahrzeugen reduziert. Hinzu kommen die Vorgaben des neuen „Fit-for-55"-Pakets, das vorgibt, dass ab 2035 alle Neuzulassungen von Pkw und LNF emissionsfrei sein müssen. Selbst für den ÖPNV und öffentlich beschaffte Flotten ist mittlerweile über die Clean Vehicles Directive geregelt, dass ein größerer Anteil der Neuanschaffungen als zurzeit „sauber" bzw. emissionsfrei sein muss.

Kaum Alternativen auf der Kurzstrecke

Alternative Antriebstechnologien sind in ihrer Anschaffung teurer als herkömmliche Fahrzeuge – besonders Brennstoffzellenfahrzeuge sind aufgrund ihrer niedrigen Stückzahlen und fehlender Infrastruktur noch nicht wettbewerbsfähig. Zwar gibt es in Deutschland für Elektro- und Wasserstoffmobilität schon länger Subventionen und Förderprogramme für Fahrzeuge und Ladepunkte („Innovationsprämie", „Förderprogramm Elektromobilität", „Schnellladegesetz" etc.), jedoch laufen wasserstoffspezifische Infrastrukturprojekte z. B. die „HyLand"-Projekte erst jetzt so richtig an. Dies spiegelt sich aktuell darin wider, dass es entsprechend auch von Herstellerseite kaum Brennstoffzellenfahrzeuge für das Pkw-Segment gibt.

Wasserstoff mit Potential im Schwerlastverkehr

Insbesondere im Bus- und Schwerlastverkehr ist jedoch damit zu rechnen, dass Brennstoffzellenfahrzeuge einen relevanten Marktanteil erlangen. Zwar ist die Energieeffizienz der Brennstoffzelle aufgrund der doppelten Umwandlung zwischen Strom und Wasserstoff niedriger als bei einer Batterie, jedoch können durch die deutlich höhere Energiedichte im Vergleich zur Stromspeicherung in Lithium-Ionen-Akkus längere Reichweiten bei schweren Fahrzeugen erzielt werden. Dieser Trend ist auch bei den Herstellern erkennbar, bei denen der Anteil an Wasserstoffbussen und -Lkws kontinuierlich steigt. Damit Wasserstoff einen positiven Einfluss auf die Klimabilanz haben kann, muss dieser auch nachhaltig produziert werden. Aktuell wird in Deutschland größtenteils grauer Wasserstoff (Herstellung aus Erdgas) produziert, der sogar schlechtere Werte in der Klimabilanz aufweist als Benzin oder Diesel. Durch die Umstellung auf blauen (mit Kohlendioxid-Speicherung – aktuell in Deutschland nicht unterstützt) oder türkisen Wasserstoff (mittels Methanpyrolyse – aktuell nicht ausgereift) bzw. endgültig durch die Erzeugung von grünem Wasserstoff (durch Elektrolyse aus grünem Strom) wird dieser erst nachhaltig [1].

Umstieg auf Gas ist nicht erfolgt

In der Vergangenheit gab es zu den Benzin- oder Diesel-Verbrennern übergreifend kaum Alternativen. Gasgestützte Kraftstoffe wie CNG oder LNG bzw. LPG („Autogas") im Pkw-Segment konnten sich nicht etablieren und besitzen – je nach Anwendung – Bestandsanteile um ein Prozent. Perspektivisch ist hier auch keine große Veränderung zu erwarten, da diese Kraftstoffe – auch wenn es Verbesserungen z. B. beim lokalen Stickstoffoxid-Ausstoß gibt – keine nennenswerten Vorteile in der Klimabilanz im Vergleich zu Benzin und Diesel aufweisen.

E- und Bio-Kraftstoffe nur bedingt eine Alternative

Stattdessen wird das Potential von synthetischen und Biokraftstoffen stärker diskutiert. Diese Kraftstoffe verwer-

ten in ihrer Produktion Kohlenstoffdioxid und weisen daher – abhängig insbesondere von der Stromquelle, die zur Erzeugung herangezogen wird – eine sehr gute Klimabilanz auf. Neben den offensichtlichen Einsatzmöglichkeiten im Schwerlastverkehr, bei Bussen mit langen Umläufen oder auch schweren Sondernutzfahrzeugen könnten diese Kraftstoffe auch im Pkw-Segment relevant werden. Hintergrund ist, dass das Erreichen der Dekarbonisierungsziele (für München Klimaneutralität in 2035) aufgrund der langen Lebenszeit der Bestandsflotte an Verbrennern nur schwer zu erreichen ist. Hier können insbesondere synthetische Kraftstoffe (für Biokraftstoff ist die Verfügbarkeit an Biomasse zu gering) als Übergangslösung helfen, die Klimabilanz der Bestandsflotte durch Umrüstung deutlich zu verbessern. Zwar sind die technischen Verfahren etabliert, ansatzweise ausreichende Produktionskapazitäten sind dafür heute jedoch nicht vorhanden und müssten gezielt aufgebaut werden. Aktuell ist davon auszugehen, dass lediglich ein Prozent des heutigen Dieselbedarfs 2030 durch E-Diesel abgedeckt werden kann.

Grüne Energie in München

Nicht nur bei synthetischen Kraftstoffen, sondern bei allen alternativen Antriebstechnologien spielen grüne Energien (z. B. Strom und Biomasse) eine bedeutende Rolle. Neben dem Einsatz als Strom für Batterien und für die Herstellung von E-Diesel (oder auch E-CNG im Falle von synthetischem Erdgas) wird grüner Strom z. B. auch für die Herstellung von grünem Wasserstoff benötigt. Aktuell liegt der Anteil erneuerbarer Energien im deutschen Strommix bei etwa 50 Prozent. Ohne den starken Ausbau von treibhausgasarmen Energien wie Wind-, Photovoltaik- und Geothermieenergie oder auch einen möglichen Hochlauf von Biogasanlagen sind die Ziele der Stadt München im Verkehrsbereich schwer zu erreichen. Hinzu kommt, dass die Stadt München und ihr näheres Umland aufgrund der hohen Einwohnerzahl eine hohe Energienachfrage haben, jedoch aufgrund ihrer Lage für die Produktion von großen Mengen an Strom auf andere Regionen angewiesen sind – in Deutschland existiert ein starkes Nord-Süd-Gefälle hinsichtlich erneuerbarer Energien. Entsprechend relevanter kann für eine Stadt wie München die unterstützende Rolle von Wasserstoff werden, da diese gut transportiert und gespeichert werden können.

2 Ziel der Studie

Die Landeshauptstadt München gehört mit eineinhalb Millionen Einwohnern zu den größten und lebenswertesten Metropolen Europas [2]. Zusammen mit den vierhunderttausend Einpendlern pro Tag beträgt die Tagesbevölkerung knapp 1,7 Millionen [3]. Themen wie klimafreundliche urbane Mobilität und Luftreinhaltung stehen somit nicht nur aufgrund des steigenden regulatorischen Drucks auf der Agenda.

Bereits im Jahr 2017 beschloss der Münchener Stadtrat, dass bis 2025 insgesamt 80 Prozent der gesamten Verkehrsleistung im Stadtgebiet durch abgasfreie Kraftfahrzeuge, den öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) sowie Rad- und Fußverkehr abzubilden ist. Die Erreichung der Klimaneutralität wurde 2019 für das Jahr 2035 beschlossen – zehn Jahre früher, als es die Bundesregierung in ihrem aktuellen Klimaschutzgesetz vorsieht. Gerade im Verkehrssektor, der in Deutschland mit etwa 20 Prozent [4] den drittgrößten Anteil an Treibhausgas-Emissionen aufweist, stellt dieses Ziel eine enorme Herausforderung dar. Durch Effizienzsteigerungen, regulatorische Vorgaben für Fahrzeughersteller wie CO_2-Flottengrenzwerte und die strenger werdenden Euro-Abgasnormen sind die Emissionen der einzelnen Fahrzeuge deutlich gesunken, und die Anteile der emissionsfreien Fahrzeuge im Straßenverkehr steigen [5]. Diesem stand bis 2020 ein Anstieg des Verkehrs in Kilometern auf deutschen Straßen entgegen [6]. Damit ist die Stagnation der Emissionen in den Jahren 2015 bis 2019 zu erklären, ehe die Corona-Pandemie 2020 eine deutliche Minderung der Emissionen um 11 Prozent im Vergleich zum Vorjahr herbeiführte.

Durch Förderprogramme wie „München emobil“, „E-Taxi“ oder auch das „Handlungsprogramm Elektromobilität“ rückte die Stadt München batteriegestützte Elektromobilität in den Fokus. Allerdings ist diese Antriebstechnologie nicht die einzige Alternative zu den herkömmlichen, mit Diesel und Benzin betriebenen Verbrennern. Um einen besseren Überblick über vorhandene und künftig am Markt verfügbare Kraftstoffe und Antriebstechnologien zu erhalten, wird diese Studie technologieoffen relevante alternative und klimafreundliche Kraftstoffe und Antriebstechnologien im Hinblick auf ihre Klimabilanz und lokalen Emissionen analysieren.

Neben den klimarelevanten Kriterien wird zudem die Ein- und Umsetzbarkeit dieser Kraftstoffe und Antriebstechnologien in ausgewählten Einsatzszenarien je Fahrzeugklasse für die Stadt München bewertet. Zudem wird der Beitrag für das Erreichen der Münchener Klimaziele im Verkehrssektor und der Ziele der Luftreinhaltung taxiert. Als Fahrzeugklassen werden neben zwei ausgewählten Pkw-Klassen, dem öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) und den Nutzkraftwagen auch drei Sondernutzfahrzeuge (Kehrmaschinen, Abfallsammelfahrzeuge und Löschfahrzeuge) betrachtet. Sechs von der Stadt München definierte Kriterien (Klimabilanz, lokale Emissionsfreiheit, Marktverfügbarkeit, Kosten, regionale Energieträgerverfügbarkeit und (inter-)nationale regulatorische Vorgaben) werden als Grundlage zur Bewertung der verschiedenen Alternativen dienen. In den Ergebnissen soll erkenntlich werden, welche alternativen Kraftstoffe bzw. Antriebstechnologien in den betrachteten Einsatzszenarien für die Stadt München am besten geeignet sind. Außerdem soll die Studie die Potentiale zur Verbesserung von Klimabilanz und Luftreinhaltung aufzeigen, die durch den Einsatz von alternativen Technologien entstehen.

Ein kurzer Ausblick zu möglichen Nachfolgestudien, z. B. zu einer ganzheitlichen Betrachtung der Energiesystemanforderungen und Umweltauswirkungen im Sinne der Ökobilanz oder auch die Erarbeitung von Transformationspfaden im Rahmen einer (sektorspezifischen) Klimaschutzstrategie, wird die Studie abschließen.

3 Methodisches Vorgehen

Um eine analytische Bewertung der alternativen Antriebstechnologien und Kraftstoffe für jedes betrachtete Einsatzszenario in der Stadt München zu entwickeln, wird ein zweiphasiger Ansatz gewählt.

Im ersten Schritt wird eine Sekundäranalyse – eine Auswertung bestehender Studien – zu Klimabilanz und lokaler Emissionsfreiheit von Kraftstoffen und Antriebstechnologien durchgeführt. Auf diese Weise werden unterschiedliche Analysen aus Forschungsprojekten und Studien zusammengefasst. Eine eigens für diesen Zweck entwickelte Anwendung mit integrierter Verwaltung der Daten und Datenquellen berechnet die Klimabilanz über den gesamten Lebenszyklus für jeden Fahrzeugtyp.

Die Definition und Ausarbeitung eines quantitativen Bewertungsschemas dient im zweiten Schritt der zielgerichteten Ausarbeitung der relevanten Kriterien für jedes Einsatzszenario. Die Quantifizierung – auch von zunächst qualitativen Merkmalen – anhand einer Skala ermöglicht einen einheitlichen Vergleich der Ergebnisse bezüglich aller Kriterien. Dieses Vorgehen unterstützt die Visualisierung und Analyse wichtiger Unterschiede der Kraftstoffe und Antriebstechnologien über die Szenarien hinweg.

3.1 Sekundäranalyse

Da Studienergebnisse untereinander Variationen – teilweise auch in erheblichem Ausmaß – aufweisen, welche zum Teil durch unterschiedliche Annahmen verursacht werden, steht die Normierung und Aggregation der relevanten Studien an erster Stelle. Dabei werden für die Klimabilanz der Kraftstoffe über ihren Lebenszyklus hinweg die Rohstoffbeschaffung und Transformation, der Transport, die Aufbereitung und Verteilung sowie die Nutzung ausgewertet. Ein ähnliches Vorgehen wird auch bei den Fahrzeugklassen angewandt. Nach der Normierung der Ergebnisse wird der Mittelwert gebildet, um die geringen Unterschiede in den Studien auszugleichen. Dieser wird in der folgenden Analyse zur Bewertung weiterverwendet. Angaben zu Klimabilanz und lokalen Emissionen ohne Quellenangabe entstammen dieser Analyse.

3.2 Bewertungsschema

Um die Vergleichbarkeit der sechs Kriterien (siehe Kapitel 7.3) für alle Fahrzeugklassen herzustellen, wird ein eigens entwickeltes Bewertungsschema benutzt. Die Definition mehrerer Unterkriterien ermöglicht eine nachvollziehbare Bewertung der betrachteten Antriebstechnologien und Kraftstoffe in den verschiedenen Einsatzszenarien. Für jedes Unterkriterium wird ein Scoring von null bis drei – je höher, desto besser – definiert, welches sich je nach Kriterium auf rein quantitative Daten oder qualitative Informationen einer ausführlichen Studienrecherche stützt. Als Vergleichsrahmen wird immer die entsprechende Fahrzeugklasse gewählt.

Aus den Bewertungen der Unterkriterien leitet sich ein Gesamtscore für das übergeordnete Kriterium ab, welcher zur gesamtheitlichen Beurteilung und Visualisierung verwendet wird.

4 Fokus, Parameter und Annahmen

In der nachfolgenden Analyse der Kraftstoffe und Antriebstechnologien werden etablierte Parameter und Konzepte verwendet, die an dieser Stelle kurz erklärt und motiviert werden.

Im Lebenszyklus von Kraftstoffen – von der Herstellung über die Nutzung bis hin zum Recycling – können Prozesse vorkommen, die die Umwelt auf unterschiedliche Art belasten. Da neben Kohlenstoffdioxid (CO_2) weitere umwelt- und gesundheitsgefährdende Stoffe (z. B. Stickstoffdioxid und Methan) ausgestoßen werden, hat die Wissenschaft ein Maß entwickelt, um die Vergleichbarkeit dieser Treibhausgase (THG) zu erhalten. Das sogenannte *Kohlendioxid-Äquivalent (CO_2e)* definiert das Erderwärmungspotential eines Treibhausgases in den kommenden 100 Jahren im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid. Beispielsweise ist das Erderwärmungspotential von einem Gramm Methan im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid um den Faktor 25 höher [7]. Zur gesamtheitlichen Bewertung der Klimabilanzen von Kraftstoffen wird daher im Folgenden das Maß Kohlendioxid-Äquivalent verwendet.

Die Well-to-Tank-, Tank-to-Wheel- bzw. kombiniert Well-to-Wheel-Klimabilanzen (siehe Abbildung 1) werden meist in Kohlendioxid-Äquivalent pro Megajoule oder Kohlendioxid-Äquivalent pro Fahrzeugkilometer, also Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule oder Kohlendioxid-Äquivalente pro Fahrzeugkilometer, angegeben. Im ersten Fall wird der Kraftstoff fahrzeugunspezifisch betrachtet, und die Klimabilanz pro Energieeinheit angegeben. Da unterschiedliche Kraftstoffe in Abhängigkeit von der Antriebstechnologie verschiedene Wirkungsgrade haben (Anteil der zugeführten Energie, der in Bewegungsenergie des Autos umgewandelt wird), führt die gleiche Energiemenge eines Kraftstoffes nicht immer zur gleichen Fahrzeugreichweite. Zur spezifischen Betrachtung wird daher in der Studie die Größe Kohlendioxid-Äquivalent pro Fahrzeugkilometer betrachtet. Viele Daten sind frei zugänglich verfügbar, zur genaueren Betrachtung der TTW-Emissionen vor allem der Lkw und der Busse wurde die HBEFA-Datenbank (Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs) verwendet [8].

Für Antriebstechnologien wird in der Klimabilanz der Prozess von der Herstellung über die Nutzung bis zum Recycling betrachtet. Es ist relevant, auf welche Art und Weise die Ausgangsmaterialien, wie beispielsweise die einer Batterie oder eines Ottomotors, nach der Benutzung verwertet werden. Somit kann Recycling zu einer Reduktion der Klimabilanz einer Antriebsart führen, wenn überdurchschnittlich viele Materialien ohne großen Aufwand wiederverwendet werden können. Ebenfalls eine Rolle bei der Berechnung der Klimabilanz spielen die Annahmen zur Laufleistung der einzelnen Fahrzeuge. Hier wird von ca. 250.000 km für Pkw und Lkw N1, ca. 600.000 km für Lkw N2/ N3 und ca. 700.000 für Busse ausgegangen.

Um die Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energien im deutschen Strommix über die Lebensdauer eines Fahrzeuges zu berücksichtigen, wird die Klimabilanz für die Stromherstellung, welche zum einen beim Strom in seiner direkten Nutzung als Kraftstoff sowie auch für die Herstellung strombasierter Kraftstoffe eingeht, als Näherung über die Periode 2020-2030 gemittelt. Es wird ein Mittelwert der THG-Emissionen pro Energieeinheit von 1.516 Gramm Kohlendioxid-Äquivalent pro Megajoule angenommen [9]. Zusätzlich wird ein Szenario betrachtet, in dem ausschließlich erneuerbare Energien zur Erzeugung von Strom verwendet werden. In diesem Fall spricht man auch von *grünem Strom*. Die Fahrzeugherstellung hingegen wird mit Blick auf heute ausschließlich basierend auf dem aktuellen Strommix analysiert, da die Emissionen

Abbildung 1: Lebenszyklus der Kraftstoffe

Der Lebenszyklus von Kraftstoffen wird in zwei Phasen aufgeteilt: **Well-to-Tank (WTT)** (engl. „well“ = „Bohrloch, Quelle“) beschreibt den Prozess, den der Kraftstoff von der Rohstoffgewinnung bis zu dem Zeitpunkt, an dem er sich im Tank des Fahrzeugs befindet, durchläuft. Bei der Betrachtung der Emissionen wird der Prozess häufig in die vier Schritte Rohstoffbeschaffung, Transformation, Transport und Aufbereitung sowie Verteilung unterteilt. Als **Tank-to-Wheel (TTW)** (engl. „wheel“= „Reifen“) wird der Nutzungs-prozess definiert, den der Kraftstoff vom Tank, über den Verbrauch im Motor bis zur Übertragung der Energie auf die Straße zurücklegt. Die Kombination dieser beiden disjunkten Prozesse nennt man **Well-to-Wheel** (WTW).

einmalig bei der Produktion und nicht über die Nutzungsdauer verteilt anfallen. Perspektivisch wird sich auch die Klimabilanz der Fahrzeugherstellung durch einen höheren Anteil erneuerbarer Energien verbessern.

Neben der Klimabilanz, die die THG-Emissionen Well-to-Wheel quantifiziert, werden zudem die lokalen Emissionen der Kraftstoffe und Antriebstechnologien analysiert. Es wird die direkte lokale Belastung der Stadt München durch Kohlstoffdioxid (CO_2), Stickoxide (NO_x), Kohlenstoffoxid (CO), Feinstaub, flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC = Non-Methane Volatile Organic Compound) und Ammoniak (NH_3) untersucht. Eine erhöhte Konzentration dieser Emissionen führt zu direkten Gefahren für Mensch und Umwelt und ist daher von großer Relevanz.

5 Analyse der Kraftstoffe

Zur Fortbewegung wandeln die Motoren der Fahrzeuge die in Kraftstoffen gespeicherte Energie in mechanische Energie um. Sie erhalten diese durch Kraftstoffe, die zur Vereinfachung grob in Öle und Gase sowie das „besondere“ Gas Wasserstoff und Strom unterteilt werden können:

Öle: Benzin, Diesel und ihre synthetischen bzw. Bio-Äquivalente.

Gase: Komprimiertes (CNG = Compressed Natural Gas) und verflüssigtes Methan (LNG = Liquified Natural Gas) und ihre synthetischen und Bio-Äquivalente sowie Autogas (LPG = Liquified Petroleum Gas).

Wasserstoff: Abhängig vom Herstellungsverfahren spricht man hauptsächlich von grauem, blauem, türkisem oder grünem Wasserstoff – wobei noch weitere vom Herstellungsverfahren abhängige Wasserstoffarten existieren.

Strom: Abhängig vom Herstellungsverfahren aus erneuerbarer, fossiler oder Kernenergie.

Zur Einordung der Kraftstoffe werden jeweils die Herstellungsverfahren und deren Klimabilanz sowie Informationen zu Transport, Verteilung und Verfügbarkeit dargestellt und in Abbildung 2 zusammengefasst.

5.1 Benzin und Diesel

Im Folgenden wird der WTW-Prozess der fossilen Rohöl-Produkte Benzin und Diesel sowie ihrer synthetischen und biogenen Äquivalente analysiert (siehe Abbildung 3).

5.1.1 Benzin

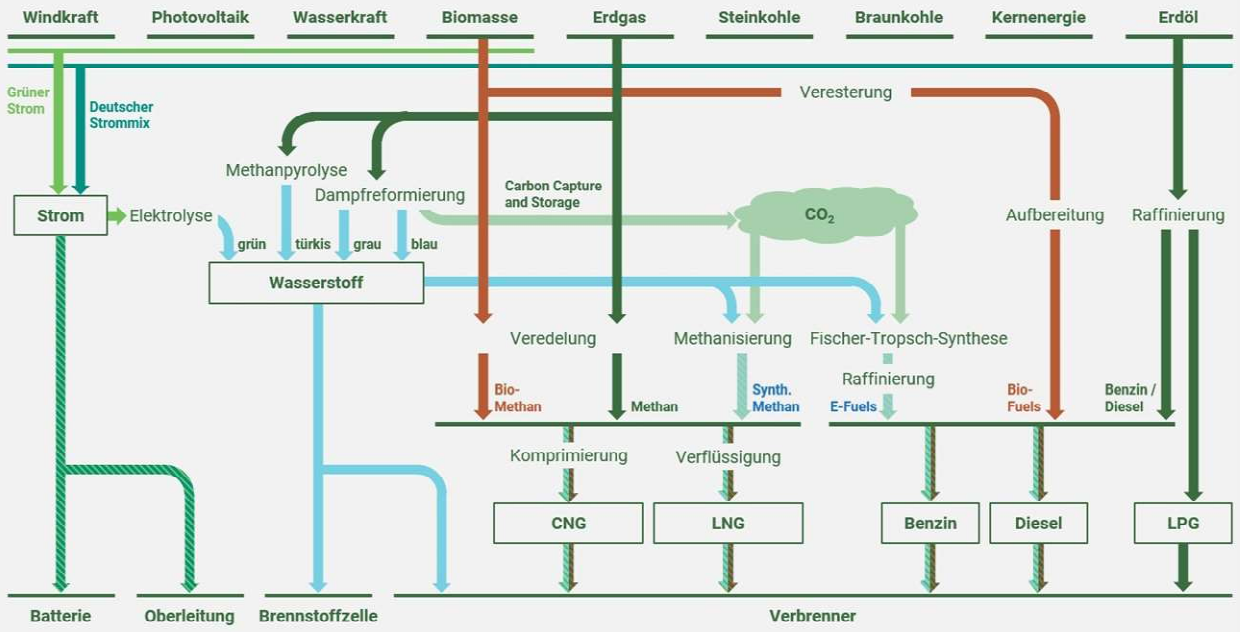
Benzin ist der Kraftstoff, den ca. 65,2 Prozent aller Pkw in Deutschland nutzen [10]. Im Mittel-, Schwerlast- und Busverkehr wird bis auf wenige Ausnahmen Diesel als Kraftstoff verwendet. An knapp 14.000 Tankstellen konnte im August 2021 für durchschnittlich 1,56 Euro pro Liter Benzin gekauft werden [11]. Neben der Verfügbarkeit ist ein weiterer Vorteil der Verbrenner-Kraftstoffe die Energiedichte. Im Vergleich zu Lithium-Ionen-Akkus kann bis zu hundertmal mehr Energie gleichen Volumen Diesel bzw. Benzin gespeichert werden.

Fossiles Benzin wird aus dem Rohstoff Erdöl gewonnen. Dieser wird nach der Förderung über Pipelines zu Erdölraffinerien transportiert, die das Erdöl trennen und zu Benzin, Diesel und anderen Stoffen weiterverarbeiten. Von dort gelangt der Kraftstoff per Pipeline, Binnenschiff und/oder Lkw zur Tankstelle.

Bei der Verwendung von Benzin als Kraftstoff entfällt der größte Anteil der Kohlendioxid-Äquivalente, ca. 72,6 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule, auf die Verbrennung im Motor (TTW = Tank-to-Wheel) und den damit verbundenen Ausstoß an Treibhausgasen und Feinstaubpartikeln. Bei den Vorkettenemissionen (WTT = Well-to-Tank) kommt Benzin auf eine Klimabilanz von 15,9 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule. Somit hat der Kraftstoff eine Well-to-Wheel-Klimabilanz von etwa 88,5 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule.

Das für die Herstellung von Benzin benötigte Rohöl muss zu großen Teilen aus Ländern wie Russland, Norwegen und Libyen [12] importiert werden; im Jahr 2018 waren das insgesamt 84,8 Millionen Tonnen. In Bayern können

Abbildung 2: Kraftstoffübersicht - Herstellungspfade und Verwendungsmöglichkeiten



nur etwa 0,25 Prozent des eigenen Erdölbedarfs durch bayrische Vorkommen gedeckt werden [13].

Synthetisches Benzin und Bio-Benzin wird aus synthetischem Rohölersatz hergestellt. Daraus werden auch die Diesel-Äquivalente erzeugt. Diese spielen bei der Reduktion der Klimabilanz des Straßenverkehrs eine deutlich größere Rolle, da der Diesel-Motor neben dem Pkw-Verkehr auch im Schwerlastverkehr verwendet wird. Da sich die Herstellung der Benzin- bzw. Diesel-Äquivalente, wie im fossilen Fall, erst in der Raffinierung unterscheidet und die WTT-Klimabilanz des synthetischen Benzins nur marginal von der des synthetischen Diesels abweicht, wird auf Kapitel 5.1.2 (Synthetischer Diesel und Bio-Diesel) verwiesen.

5.1.2 Diesel

Die drei unterschiedlichen Herstellungsformen des Kraftstoffs Diesel werden im Folgenden erläutert.

Fossiler Diesel

Diesel-Pkw machen in Deutschland circa 31,2 Prozent aller Fahrzeuge aus. Der Kraftstoff besitzt mit 93,7 Prozent (von 3,4 Millionen) im Lkw-Verkehr und 94,6 Prozent (von 75.500) im Bus-Verkehr eine Vormachtstellung im deutschen Schwerlastverkehr [10]. Für einen durchschnittlichen Preis von 1,39 Euro pro Liter konnte Diesel im August 2021 an knapp 14.000 Tankstellen in Deutschland erworben werden [11].

Da sowohl die Herstellung als auch der Transport von Diesel und Benzin nahezu deckungsgleich sind, ähneln sich die WTT-Klimabilanzen. Beim Diesel sind es vor allem Stickoxide, die die lokalen Emissionen erzeugen und somit Haupttreiber der TTW-Emissionen sind. Insgesamt (Well-to-Wheel = WTW) kommt Diesel auf eine Klimabilanz von 90,6 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule. Die WTT- bzw. TTW-Emissionen betragen 16,7 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule bzw. 73,9 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule.

Neben dem fossilen Verfahren zur Gewinnung von Diesel existiert eine Reihe alternativer Herstellungspfade, die sich in zwei Kategorien einteilen lassen: synthetischer bzw. strombasierter Diesel und Biodiesel.

Synthetischer Diesel

Diesel ist, wie andere organische fossile Kraftstoffe auch, eine Kohlenwasserstoffverbindung. Bei synthetischem Diesel (auch SynDiesel, Fischer-Tropsch-Diesel oder E-Fuel bzw. E-Diesel genannt) handelt es sich um einen strombasierten, synthetischen Flüssigkraftstoff, der unter Aufwendung elektrischer Energie anstatt fossiler Energiequellen hergestellt werden kann. In der sogenannten Fischer-Tropsch-Synthese (FT-Synthese) wird ein aus Wasserstoff und Kohlenstoff bestehendes Synthesegas zu einem Rohölersatz verarbeitet. Von dort können dieselben Verarbeitungsverfahren wie bei der Raffinierung von fossilem Rohöl zu Diesel durchlaufen werden.

Lokale Emissionen treten aufgrund der Verarbeitung des Kohlenwasserstoff-Produkts im Verbrennungsmotor trotzdem auf. Die WTT-Klimabilanz hängt stark von der Herkunft bzw. der Farbe des verarbeiteten Wasserstoffs ab. Wenn grüner, türkiser oder blauer Wasserstoff (siehe Kap. 5.1.3) eingesetzt werden, ist eine annähernd klimaneutrale Verwendung von synthetischem Diesel in der Theorie möglich. Synthetischer Diesel wird aktuell nur in Pilotanlagen, beispielsweise in Norwegen, produziert. Es existiert noch kein Markt und somit gibt es auch keine kommerziellen Erfahrungswerte – die Wirtschaftlichkeit ist daher noch nicht absehbar.

Die WTW-Klimabilanz ist beim aktuellen Strommix in Deutschland, der zurzeit bei ca. 50 Prozent erneuerbaren Energien liegt, knapp dreimal so hoch wie beim fossilen Diesel, ca. 275 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule. Werden grüne Energiequellen verwendet, sind merkliche THG-Einsparungen von rund 83 Prozent im Vergleich zum fossilen Diesel (91 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule) möglich. Der energetische Aufwand hingegen ist um ein Vielfaches höher: Statt einen einzigen Kompaktwagen mit E-Diesel zu betreiben, könnten bei gleicher elektrischer Energie sechs batterieelektrische Kompaktwagen betrieben werden [14].

Der Dieselbedarf kann zwar nicht durch synthetischen Diesel gedeckt werden, doch eignet er sich als Energiespeicher bei überschüssigem grünem Strom. Ab 2030 könnte ungefähr ein Prozent des Flüssigkraftstoffbedarfs durch synthetischen Diesel gedeckt werden [15].

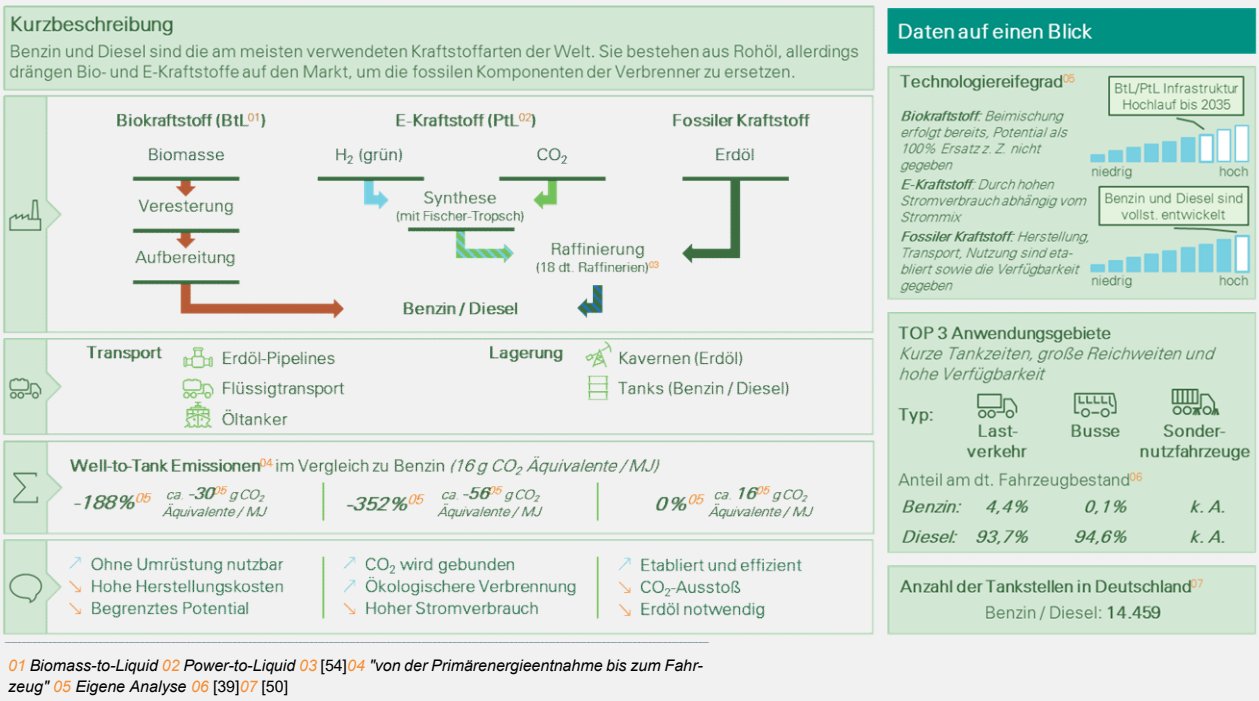
Biodiesel

Auch pflanzliche und tierische Öle und Fette werden zur Produktion von Diesel eingesetzt. Aus diesen Edukten wird der Stoff „Fatty Acid Methyl Ester“ (FAME), häufiger unter dem Namen Biodiesel bekannt, hergestellt.

Die Herstellung von Biodiesel ist technologisch vollständig ausgereift und kommerziell verfügbar. Er macht im Jahr 2021 etwa sieben Prozent des Diesels an der Tankstelle aus (Diesel B7). Lediglich in Einzelfällen kann reiner Biodiesel getankt werden. Hierfür sind kleine Anpassungen am Fahrzeug nötig [16]. Das Gesamtpotential der Biokraftstoffe für den Verkehrsbereich beträgt ca. sieben Prozent bis 11 Prozent des heutigen Kraftstoffverbrauchs in Deutschland [9].

Die Entnahme von Kohlenstoffdioxid aus der Luft durch die angebauten Pflanzen kann den WTW-Treibhausgasemissionen angerechnet werden. So erzielt Biodiesel bei der kombinierten Betrachtung aller Verfahren, Well-to-Wheel, eine durchschnittliche Reduktion der Treibhausgase von 52 Prozent im Vergleich zu herkömmlichem Diesel.

Abbildung 3: Steckbrief – Benzin und Diesel



So genannte OME- (Oxymethylenether) sowie GtL-Kraftstoffe (Gas-to-Liquid) werden in dieser Studie nicht näher analysiert. Für OME-Kraftstoffe fehlen bisher industrielle Produktionsanlagen, sodass eine umfassende Bewertung nicht stattfinden kann. GtL-Kraftstoffe sind eine Alternative und eine Beimischung zum herkömmlichen Diesel ist möglich, wird aufgrund der fossilen Herkunft des Gases allerdings ebenfalls hier nicht weiter betrachtet.

5.2 Wasserstoff

Wasserstoff (H2) (siehe Abbildung 4) ist ein Gas, das ohne Emissionen verbrennt und klimaneutral erzeugt werden kann. Im Jahr 2021 existieren nur 72 Tankstellen im gesamten Bundesgebiet. Neben der Verwendung als Kraftstoff ist Wasserstoff eine wichtige Grundlage für die Herstellung synthetischer Kraftstoffe.

Je nach Syntheseverfahren unterscheidet man zwischen grünem, türkisem, blauem und grauem Wasserstoff. Es werden mitunter immer weitere Farben für unterschiedliche Herstellungsvarianten des Wasserstoffs verwendet, diese Studie beschränkt sich allerdings auf die vier Verbreitetsten Herstellungsverfahren / Farben. Mit Wasserstoff können Fahrzeuge in nur wenigen Minuten vollständig betankt (PKW bei 700 bar, Busse bei 350 bar) und mit Brennstoffzellen oder Verbrennungsmotoren (Speicherung bei -250°C) angetrieben werden. Fahrzeuge, die mit reinem Wasserstoff betrieben werden, sind unabhängig von der Antriebstechnologie lokal emissionsfrei, sodass eine Betrachtung der WTW-Klimabilanzen mit der Betrachtung der WTT-Klimabilanzen gleichzusetzen ist.

Die Wasserstoffsynthese ist eine etablierte Technologie. Sie wird bereits vielseitig in der chemischen Industrie eingesetzt. **Grüner Wasserstoff** wird bei der Elektrolyse mit erneuerbaren Energien klimaneutral gewonnen. Je nach Verfahren sind hierbei Wirkungsgrade von 62 Prozent bis 85 Prozent möglich [17], was zu WTT-Wirkungsgraden von mindestens 52 Prozent führt. Die Elektrolyse ist energieintensiv. Da das deutsche Stromnetz nicht vollständig aus klimaneutralen Energiequellen versorgt wird, ist die Betrachtung von grünem Wasserstoff bilanzieller Natur. Die Herstellung von Wasserstoff mit dem aktuellen Strommix weist Well-to-Wheel eine doppelt so hohe Klimabilanz wie Benzin und Diesel auf.

Mit einem Anteil von 40 Prozent an der deutschen Wasserstoffproduktion ist das Verfahren der Dampfreformierung deutlich verbreiteter. Es entsteht sogenannter **grauer Wasserstoff.** Im Verfahren wird Methan in einem mehrstufigen Prozess zu Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid umgewandelt. Es werden etwa zehn Tonnen Kohlenstoffdioxid bei der Produktion einer Tonne Wasserstoff frei [17] bei einer WTW-Klimabilanz von 102 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule. Der Prozess kann klimafreundlicher stattfinden, wenn das Kohlenstoffdioxid mit der Methode „Carbon Capture and Storage“ (CCS) gebunden wird – in diesem Fall spricht man von **blauem Wasserstoff** (WTW-Klimabilanz = 43 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule) – wobei auch die nachhaltige Lagerung des Kohlenstoffdioxids sichergestellt werden muss.

Abbildung 4: Steckbrief – Wasserstoff

Kurzbeschreibung

Wasserstoff zeichnet sich als Kraftstoff durch lokale Emissionsfreiheit, große Reichweiten und kurze Tankzeiten aus. Je nach Syntheseverfahren unterscheidet man zwischen grünem, türkisem, blauem und grauem Wasserstoff.

Grüner Wasserstoff	Türkiser Wasserstoff	Blauer Wasserstoff	Grauer Wasserstoff
Elektrolyse	Methanpyrolyse	Dampfreformierung + CCS[01]	Dampfreformierung
*Wasser wird mit **Strom** aus erneuerb. Energien in H_2 und O_2 gespalten*	*Methan wird mittels Pyrolyse in H_2 und C gespalten*	*Methan wird in H_2 und CO_2 umgewandelt – CO_2 wird aufgefangen*	*Methan wird in H_2 und CO_2 umgewandelt*
↗ Etabliert und effizient	↗ Min. Stromaufwand	↗ CO_2 wird gebunden	↗ *Etabliert und effizient*
↗ Kein CO_2-Ausstoß	↗ Kein CO_2-Ausstoß	↘ Geringe Effizienz	↘ *CO_2-Ausstoß*
↘ Hoher Strombedarf	↘ Erdgas notwendig	↘ Erdgas notwendig	↘ *Erdgas notwendig*
7%[02] *Anteil an dt. H_2-Mix*	*0%*[02] *Anteil an dt. H_2-Mix*	*0%*[02] *Anteil an dt. H_2-Mix*	*40%*[02] *Anteil an dt. H_2-Mix*

Etwa die Hälfte des dt. Wasserstoffs entsteht als Nebenprodukt in Industrieprozessen

Transport	Lagerung
H_2 Pipelines oder Gasnetz	Druckspeicher
Flüssigtransport	Flüssigspeicher
Druckgasbehälter	Stoffspeicher

Well-to-Tank Emissionen[03] im Vergleich zu Benzin *(16 g CO_2 Äquivalente / MJ)*

-31%[04]	+106%[04]	+168%[04]	+537%[04]
ca. 11[04] g CO_2 Äquivalente / MJ	*ca. 33[04] g CO_2 Äquivalente / MJ*	*ca. 43[04] g CO_2 Äquivalente / MJ*	*ca. 102[04] g CO_2 Äquivalente / MJ*

Daten auf einen Blick

Technologiereifegrad[04] — Erwarteter Hochlauf auf max. Level in 2030

Etablierte Technologie, aber noch recht kleine Tankstelleninfrastruktur

niedrig — hoch

TOP 3 Anwendungsgebiete

Kurze Tankzeiten, große Reichweiten und lokale Emissionsfreiheit

Typ:	Schwerlastverkehr	Busse	Sondernutzfahrzeuge
Anteil am dt. Fahrzeugbestand[05]			
H_2:	0,1%	0,04%	< 0,01%
Benzin:	*0,0%*	*0,1%*	*k. A.*
Diesel:	*99,7%*	*94,6%*	*k. A.*

Anzahl der Tankstellen in Deutschland

H_2: 92[06] Vorgabe 2035[07]: mind. 600

(Benzin / Diesel: 14.459)

01 CO_2-Abscheidung und -Speicherung 02 [56] 03 "von der Primärenergieentnahme bis zum Fahrzeug" 04 Eigene Analyse 05 [39] 06 [51] 07 EU: „Fit for 55“, TEN-V Netz Europa, Juli 2021

Türkiser Wasserstoff wird durch das Verfahren der Methanpyrolyse hergestellt, welches sich noch in der Entwicklungsphase befindet. Aus Methan gewonnen, entsteht hierbei reiner Kohlenstoff, sodass bei der Produktion theoretisch keine direkten Treibhausgasemissionen anfallen. Praktisch können im Lauf der Vorprozesse kleine Mengen Methan entweichen, die ein erheblich größeres Treibhauspotential aufweisen als Kohlenstoffdioxid. Allerdings ist im Prozess deutlich weniger elektrische Energie notwendig als bei der Elektrolyse, sodass türkiser Wasserstoff mit 33 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule nur etwa 37 Prozent der Klimabilanz von Benzin aufweist.

5.3 Gaskraftstoffe

Am Markt differenziert man zwischen drei Kohlenstoffreichen Gas-Kraftstoffen. Diese werden im Folgenden analysiert.

5.3.1 CNG

Compressed Natural Gas (siehe Abbildung 5) ist bei großem Druck komprimiertes Gas und kann auf fossilem (Erdgas) und auf nachhaltigem (Biomethan, synthetisches Methan) Weg gewonnen werden. Etwa 0,2 Prozent der Pkw in Deutschland fahren mit diesem Kraftstoff. Für Lkw und Busse liegt dieser Wert bei 0,4 Prozent bzw. 1,2 Prozent.

Fossiles CNG

Hauptförderländer von Erdgas sind die Vereinigten Staaten, Russland, Iran und China [18]. Deutschland bezieht sein Erdgas hauptsächlich aus Norwegen, Russland und den Niederlanden [19]. Das überwiegend aus Methan bestehende Gas wird mit bestimmten Bohrverfahren gefördert. An der Erdoberfläche befreit eine Trocknungsanlage das Gas von Wasser und anderen unerwünschten Stoffen. Aufwändige Aufbereitungsverfahren sind nicht notwendig.

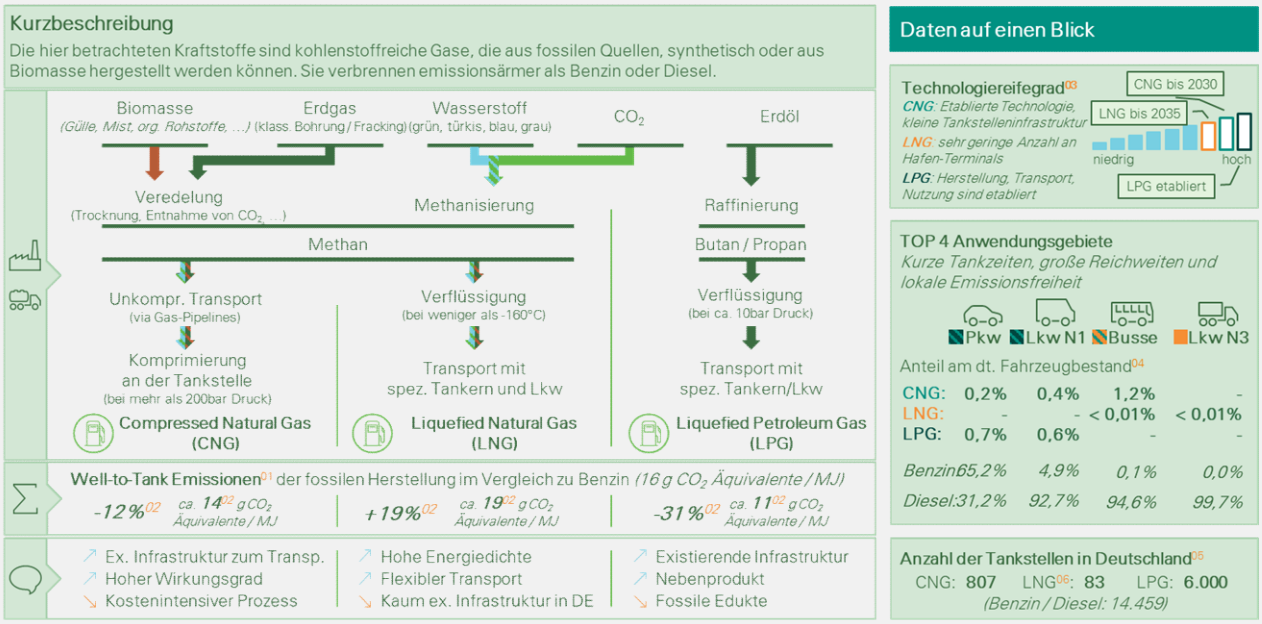
Das Erdgas gelangt über Pipelines und mit dem Lkw an die Tankstelle, wo es, bei einem Druck von 200 bar auf unter 1 Prozent seines Volumens bei Normalbedingungen verdichtet, gelagert wird und getankt werden kann [20].

Ein entscheidender Faktor für die Klimabilanz des fossilen CNG ist der Ursprung des Gases. Sowohl die aufwändige Installation langer Pipelines als auch die Betriebsaufwendungen, um Gas weite Strecken durch Rohre zu transportieren, sind nicht zu vernachlässigen [21]. Die WTT-Klimabilanz des EU-Gas-Mix für CNG liegt mit 14,43 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule leicht unter der von fossilem Benzin und Diesel.

Bio-CNG

Eine Alternative zum Erdgas ist, das aus Biomasse produzierte, Biomethan. Biomasse setzt sich aus nachhaltig und gewässerverträglich angebauten Energiepflanzen, Gülle, Mist und kommunalen und industriellen organischen Reststoffen zusammen. In den rund 200 Biogasanlagen Deutschlands werden diese Stoffe unter Ausschluss von Sauerstoff und Licht vergoren [22]. Das dabei produzierte Methan wird, über das in Deutschland weit ausgebaute Gasnetz, an die Tankstellen verteilt und dort komprimiert. 0,2 Prozent des in Deutschland verbrauchten Erdgases wird für Kraftstoffe im Verkehr verwendet. Der

Abbildung 5: Steckbrief – Gaskraftstoffe



01 "von der Primärenergieentnahme bis zum Fahrzeug" 02 Werte für fossile Edukte (eigene Analyse) 03 Eigene Analyse 04 [39] *05* [52] *06 EU: „Fit for 55" ausreich. Ausbau der öffentl. LNG-Tankst. für den Schwerlastverkehr bis 1. Januar 2025 entlang des TEN-V Netz in Europa*

Erdgasmix in Deutschland setzt sich dabei zu 0,93 Prozent aus Biomethan zusammen. Mithilfe von Zertifikaten können Anteile am Biomethan erworben werden; das führt dazu, dass rechnerisch 19 Prozent Biomethan in CNG-Kraftstoffen enthalten ist. Physisch ist dies aber im Gegensatz zu Biodiesel nicht der Fall, da die Tankstellen meist aus dem Erdgasnetz gespeist werden [9]. Die WTT-Klimabilanz für Bio-CNG liegt durch den Pflanzenanbau und dessen negative Kohlenstoffdioxid-Bilanz bei -44,57 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule.

Synthetisches CNG

Eine weitere Möglichkeit, nachhaltiges CNG herzustellen, bietet die Synthetisierung (PtG = Power-to-Gas). Hierfür wird grüner Wasserstoff (siehe Kap. 5.1.3) mit Kohlendioxid in einem Methanisierungsprozess in Methan und Sauerstoff umgewandelt. Das verwendete Kohlenstoffdioxid wird entweder in Biogasanlagen, anderen industriellen Prozessen oder direkt aus der Luft (Direct Air Capture) gewonnen. Da das produzierte Methan identische Brenneigenschaften wie Erdgas besitzt, kann es ebenfalls dem deutschen Erdgasnetz beigemischt werden. Ausschlaggebend für die Klimabilanz von -39,95 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule sind die Herstellungsprozesse der Stoffe, die bei der Methanisierung verwendet werden (Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid).

An den (Stand Juni 2021) ca. 800 CNG-Tankstellen in Deutschland [23], von denen knapp die Hälfte hundert Prozent Biogas vertreibt, wurde CNG im Jahresdurchschnitt 2020 zu einem Preis von 1,10 Euro pro Kilogramm verkauft [24]. Im Vergleich zu Super (1,29 Euro pro Liter) und Diesel (1,11 Euro pro Liter) ist dies ökonomischer. Verrechnet man zudem noch den Energiegehalt der Kraftstoffe, der pro Kilogramm Kraftstoff um 54 Prozent bzw. 34 Prozent im Vergleich zu Benzin und Diesel höher ist, erhält man eine Preisersparnis von 39 Prozent bzw. 26 Prozent.

5.3.2 LNG

Liquified Natural Gas (siehe Abbildung 5), welches in Deutschland als „Erdgas, tiefkalt verflüssigt" oder „Flüssigerdgas" bekannt ist, kann aus den gleichen drei Herstellungsprozessen wie CNG gewonnen werden (fossiles Erdgas, Biomethan und synthetisches Methan). Einzig die Komprimierung des Gases an der Tankstelle wird durch eine Verflüssigung des Gases bei Temperaturen um die -160 Grad Celsius ersetzt. Damit verbunden ist eine Volumenverringerung um 99,8 Prozent [25]. Dies bietet beim Transport, der Lagerung und der erzielbaren Reichweiten bei gleichem Tankvolumen Vorteile gegenüber dem CNG. Im Gegensatz zu CNG wird das Gas nicht in Pipelines, sondern in speziellen LNG-Tankern und -Tankwagen transportiert, die es auf der ganzen Welt verteilen, und in LNG-Terminals an den Häfen gelagert. In Deutschland existieren diese bisher nicht, allerdings werden vier Standorte in Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern in Erwägung gezogen. Es existieren ca. 70 Tankstellen in Deutschland.

LNG ist aufgrund der besonderen Eigenschaften, die der Tank mit sich bringen muss (v.a. kältebeständig), nur für große Nutz-/Schwerlastfahrzeuge und den Schiffsverkehr nutzbar. Hier stellt es eine – bei ausschließlicher Betrachtung der lokalen Emissionen – klimafreundlichere Alternative zu Diesel dar. Die WTT-Klimabilanzen des fossilen, synthetischen bzw. Bio-LNG unterscheiden sich trotz der

Verflüssigung kaum von der des jeweiligen CNG-Äquivalents.

5.3.3 LPG

Liquified Petroleum Gas (siehe Abbildung 5), welches in Deutschland als „Autogas“ bekannt ist, ist ein rein fossiler Brennstoff, der bei der Erdgas- und Erdölförderung sowie in Erdölraffinerien als Nebenprodukt anfällt. Vor allem auf Offshore-Plattformen wurde das unter Normalbedingungen (25 Grad Celsius, ca. 1 bar) gasförmige LPG aus wirtschaftlichen Gründen lange Zeit an Ort und Stelle abgefackelt. Mittlerweile ist der Wert des Gases als Energieträger gestiegen, und es lohnt sich für die Förderplattformen und Raffinerien, das Gas zu verflüssigen und anschließend zu verkaufen.

Der Transport findet mit speziellen LPG-Tankern bzw. -Tankwagen statt. Nach dem Transport zu Zwischenlagern wird es von dort an die rund 6.000 Tankstellen in Deutschland verteilt. Die WTT-Klimabilanz ist mit 10,83 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule die Niedrigste aller fossilen Kraftstoffe. WTW kommt das fossile LPG auf 76,63 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule.

5.4 Strom

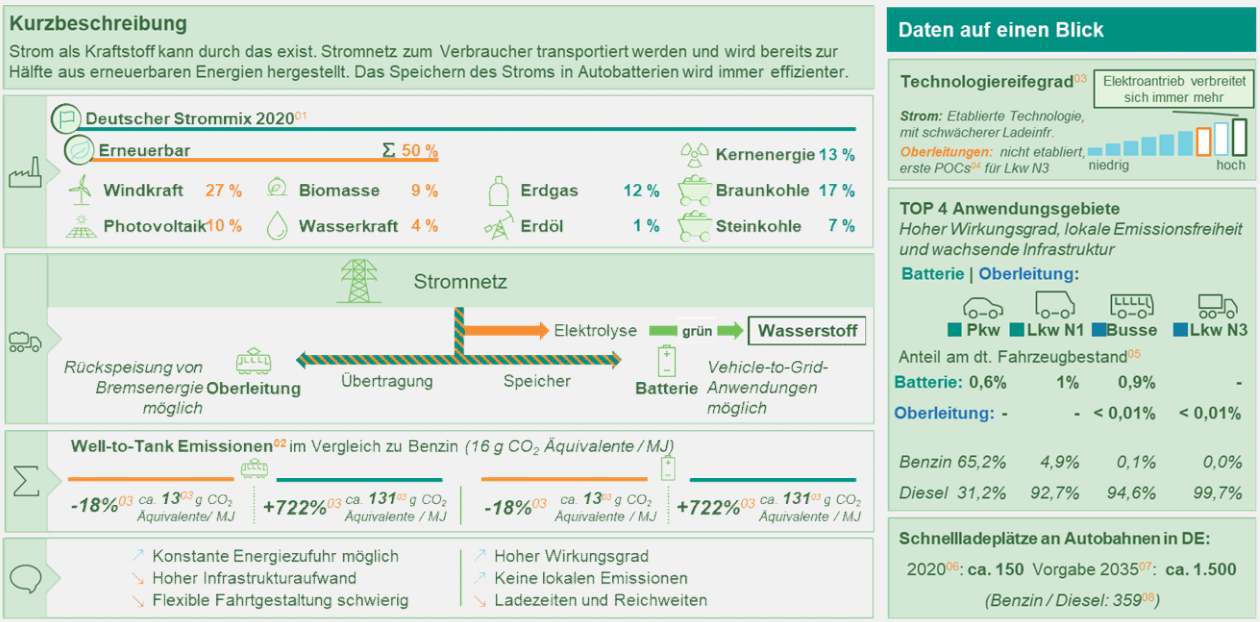
Strom (siehe Abbildung 6) als Kraftstoff wird in Plug-In-Hybrid-Fahrzeugen, Oberleitungsfahrzeugen und in batterieelektrischen Fahrzeugen verwendet. Deutschland erzeugt und bezieht etwa die Hälfte seines Stroms aus erneuerbaren Energien [26]:

» Windkraft (27 Prozent),
» Photovoltaik (zehn Prozent),
» Biomasse (neun Prozent),
» Wasserkraft (vier Prozent).

Den Rest decken Braun- und Steinkohle, Kernenergie, Erdgas und Erdöl ab. Über die existierenden Stromtrassen kann der Kraftstoff zu jeder beliebigen Ladeeinrichtung transportiert und dort vom Auto zur Ladung gezogen werden. Mit rund 200 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Megajoule liegt die WTT-Klimabilanz für den deutschen Strommix etwa 700 Prozent über der von Benzin. Erneuerbarer Strom kann eine Reduktion von 18 Prozent im Vergleich zu Benzin erzielen und hat den Vorteil, Tank-to-Wheel keine Emissionen zu erzeugen.

Aufgrund der steigenden Nachfrage an Strom im Transportsektor sowie auch durch die Elektrifizierung weiterer Sektoren wird das Stromnetz in Deutschland aktuell und perspektivisch stark ausgebaut. Beispiele hierfür sind die großen Vorhaben SüdLink und SüdOstLink zum Kapazitätenausbau der Verbindung zwischen Nord- und Süddeutschland.

Abbildung 6: Steckbrief – Strom

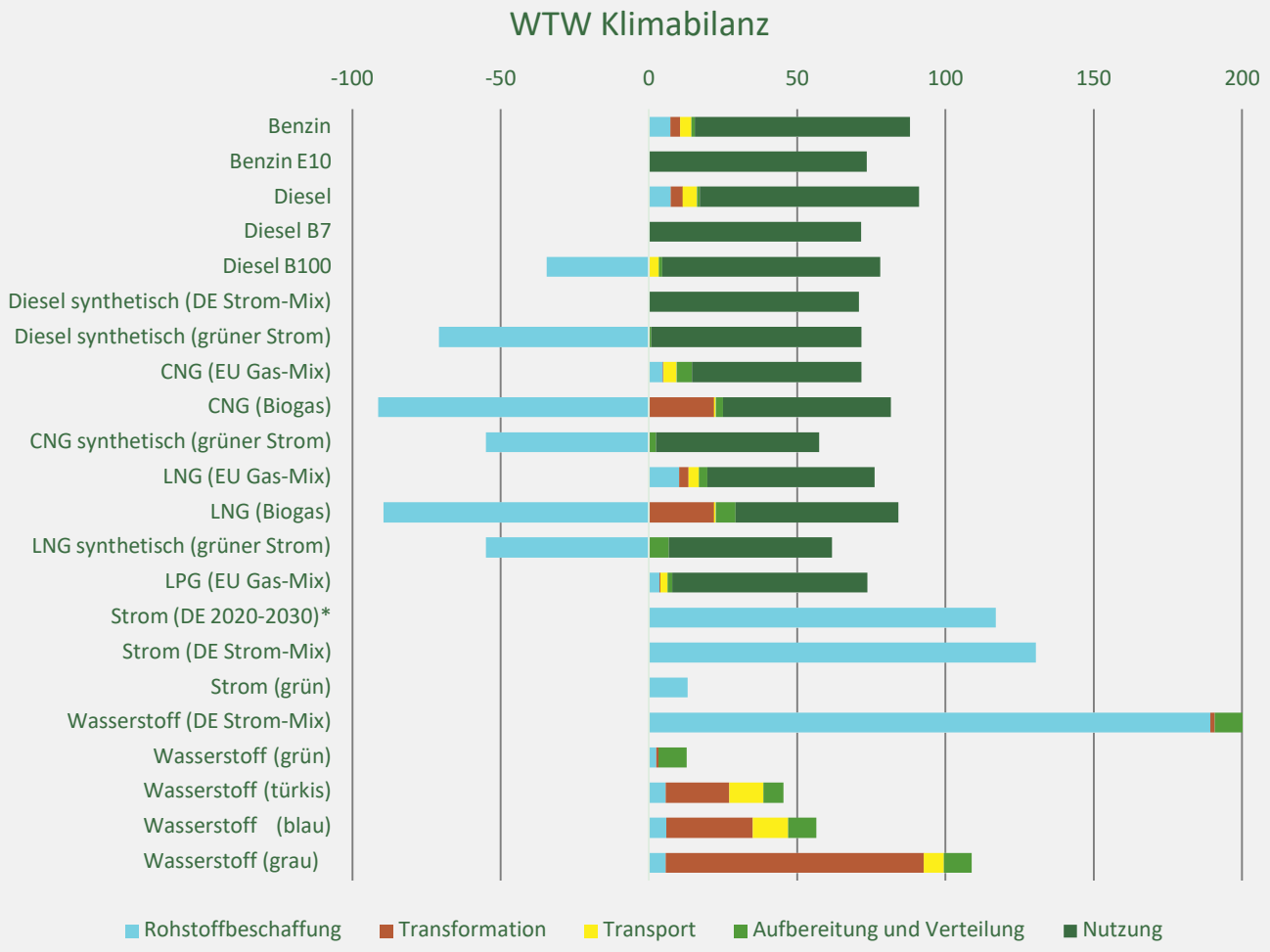


01 [26] 02 "von der Primärenergieentnahme bis zum Fahrzeug" 03 Eigene Analyse 04 Proof of Concepts 05 [39] 06 Bundesnetzagentur - Elektromobilität/Öffentliche Ladeinfrastruktur 07 EU: „Fit for 55“, TEN-V Netz Europa, Juli 2021 08 [50]

5.5 Klimabilanzen der Kraftstoffe

Es kann zusammengefasst werden, dass die Nutzung der Kraftstoffe die Klimabilanz aller Gase und Öle deutlich verschlechtert, während bei den alternativen Kraftstoffen Strom und Wasserstoff der Großteil der THG-Emissionen bei der Beschaffung und Transformation auftreten (siehe Abbildung 7). Die Werte der Klimabilanzen der Gase sind bei der Nutzung geringfügig kleiner als die beim Diesel oder Benzin. Es treten in der kumulierten Klimabilanz somit nur deutliche Unterschiede bei den Verbrenner-Kraftstoffen auf, wenn beispielsweise hundert Prozent Biogas verwendet wird und aufgrund der Wiederverwendung negative Klimabilanzen entstehen. Die großen Unterschiede beim Wasserstoff und beim Strom rühren zum einen vom verwendeten Strommix (grüner vs. bunter Strommix) und der verwendeten Transformationsmethode. Lokal emissionsfrei ist nur die Verwendung von Wasserstoff und Strom.

Abbildung 7: Klimabilanz aller Kraftstoffe



Als Maß für die WTW-Klimabilanz werden die Kohlendioxid-Äquivalente pro Energieeinheit (Megajoule), die der Kraftstoff besitzt, gemessen. Synthetische und biogene Kraftstoffe, die in ihrer Herstellung Kohlendioxid der Luft entnehmen, haben teilweise sogar negative Gesamtwerte. Benzin ist bei der Herstellung und Nutzung eines einzelnen Megajoule umweltfreundlicher als der deutsche Strommix von 2020 bis 2030. Allerdings brauchen Verbrennungsmotoren aufgrund ihrer geringen Energieeffizienz deutlich mehr Energie als andere Antriebstechnologien.

* Mittelung des erwarteten Strom-Mix‘ in Deutschland

6 Analyse der Antriebstechnologien

Die Kraftstoffe werden in verschiedenen Antriebstechnologien verwendet. Eine Aufteilung erfolgt nach Verbrennungs-, Elektro- und Hybrid-Motoren. Unterschiede innerhalb dieser Kategorien finden sich bei den unterschiedlichen Energiewandlern und -trägern. Auf dem Markt sind folgende Kombinationen von Antriebstechnologien und Kraftstoffen verfügbar (siehe auch Abbildung 8):

- Verbrennungsmotor (Benzin, Diesel, Gase, H_2)
- Hybrid (Benzin, Diesel)
- Plug-In-Hybrid (Strom, Benzin, Diesel)
- Batterieantrieb (Strom)
- (Hybrid-)Oberleitung (Strom, Diesel)
- Brennstoffzellenantrieb (H_2)
- Batterieantrieb mit Brennstoffzelle zur Reichweitenverlängerung (Wasserstoff, Strom)

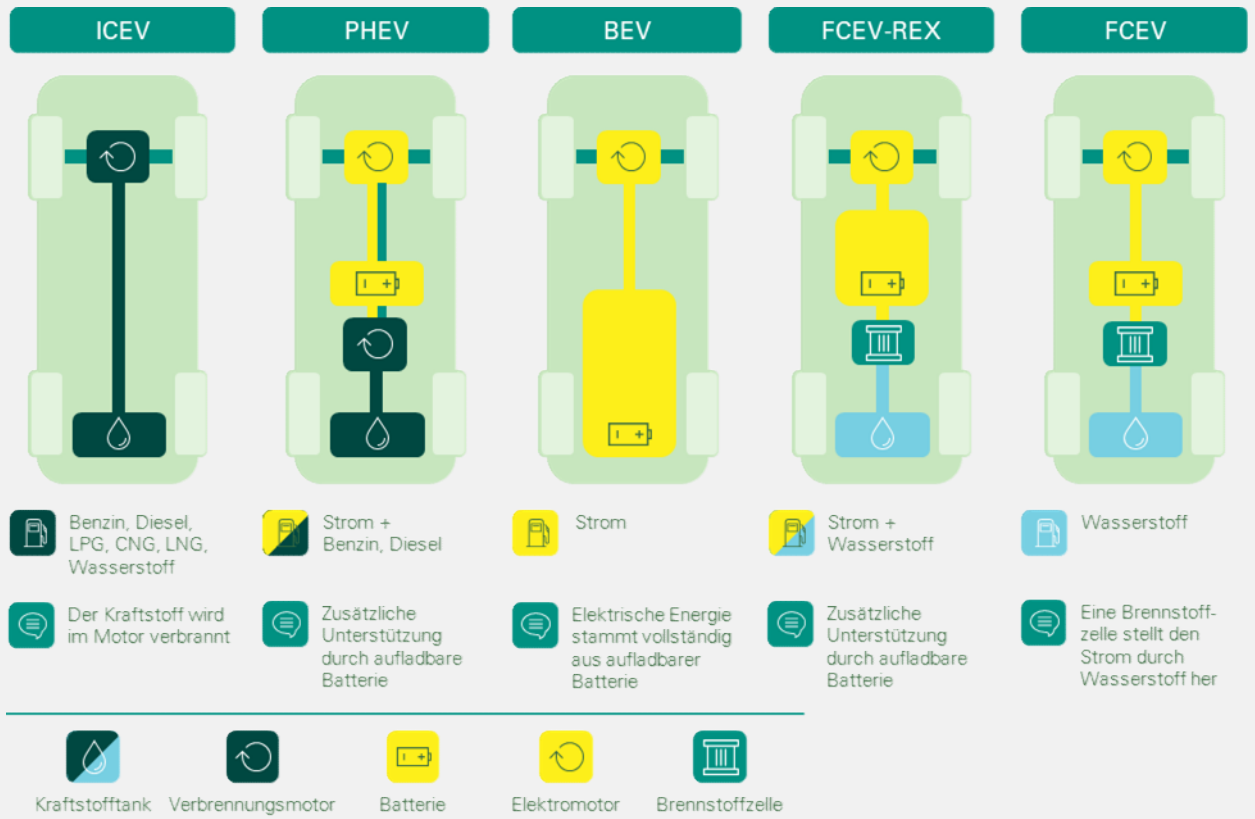
Nicht jede Antriebstechnologie kann sinnvoll bei jeder der ausgewählten Fahrzeugklassen eingesetzt werden. In der Bewertung der Einsatzszenarien wird daher eine geeignete Auswahl der Kombinationen betrachtet (siehe Abbildung 19 im Anhang).

6.1 Verbrennungsmotor

Der Verbrennungsmotor (ICEV = Internal Combustion Engine Vehicle) ist die am stärksten verbreitete Antriebstechnologie in Deutschland. Durch die Verbrennung eines meist fossilen Kraftstoffes unter Verwendung von Sauerstoff aus der Luft als Katalysator expandiert das Luft-Kraftstoff-Gemisch. Die Energie dieser chemischen Reaktion wird durch den Motor in mechanische Energie umgewandelt und treibt das Fahrzeug an. Das dadurch entstehende Gasgemisch wird über die Abgasanlage aus dem Motor in die Umwelt geleitet. Je nach Fahrzeugtyp kommen hierbei hauptsächlich Benzin oder Diesel zum Einsatz. Alternativ können CNG, LNG und LPG verwendet werden.

Da Kohlenwasserstoffe bei der Verbrennung mit Sauerstoff zu Kohlenstoffdioxid reagieren, entstehen mit organischen Kraftstoffen immer lokale Emissionen. Die einzige Ausnahme stellt die Verwendung von Wasserstoff im Verbrennungsmotor dar. Hier wird bei der Verbrennung lediglich Wasser ausgestoßen. Der Einsatz von Wasserstoff in

Abbildung 8: Übersicht der Antriebstechnologien



Die mechanische Energie, die für den Antrieb des Fahrzeugs benötigt wird, kann entweder durch einen Elektromotor oder einen Verbrennungsmotor bereitgestellt werden. Unterschiede in den Antriebstechnologien kommen dabei erst durch den Energieträger zustande. So können elektrische Fahrzeuge entweder von einem Verbrennungsmotor (PHEV), einer Batterie (BEV), einer Brennstoffzelle (FCEV/FCEV-REX) oder über eine Oberleitung (nicht abgebildet) mit Strom versorgt werden.

Verbrennungsmotoren wurde bisher vereinzelt in Pilotprojekten erforscht, die aufgrund der Überlegenheit des Brennstoffzellenantriebs durch erheblich höheren Wirkungsgrad jedoch zunächst nicht weiterverfolgt wurden.

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren weisen große Reichweiten sowie kurze Tankzeiten auf. Dies ist für den Betrieb ein essenzieller Vorteil, der den Wechsel auf beispielsweise batterieelektrische Antriebe bisher erschwert hat. Allerdings ist der Gesamtwirkungsgrad von Verbrennungsmotoren im Vergleich sehr niedrig – Gas- oder Diesel-Pkw weisen hier Werte von nur 24 Prozent auf. Der Wirkungsgrad fällt noch geringer aus, wenn synthetische Kraftstoffe verwendet werden [27].

6.2 Hybrid

Hybrid-Fahrzeuge (HEV = Hybrid Electric Vehicle) nutzen vorwiegend einen Verbrennungsmotor, der üblicherweise mit Benzin oder Diesel versorgt wird. Zusätzlich ist ein Elektromotor mit einer kleinen Batterie eingebaut, der den Verbrennungsmotor beim Anfahren oder Beschleunigen unterstützen kann. Der nötige Strom wird über Rekuperation, die Rückgewinnung von Bremsenergie, generiert. Ein externes Laden der Batterie ist nicht möglich.

Man unterscheidet zwischen parallelem und seriellem Hybrid. Beim parallelen Hybrid wirken der Verbrennungsmotor und der Elektromotor gemeinsam auf den Antrieb. So ist es möglich, beide Einzelmotoren separat anzusteuern oder mit einem Energiemix aus beiden Motoren zu fahren. Beim seriellen Hybrid sind die beiden Motoren in Serie geschaltet. Der Verbrennungsmotor treibt einen Generator an, der die Batterie lädt, die wiederum den Elektromotor mit Energie versorgt. Dieser im Vergleich zum parallelen Hybrid deutlich größere Elektromotor überträgt die Energie dann auf die Antriebsachse.

6.3 Plug-In-Hybrid

Plug-In-Hybride (PHEV = Plug-In Hybrid Electric Vehicle) zeichnen sich im Gegensatz zum einfachen Hybrid-Fahrzeug durch eine deutlich größere Batterie aus, die neben der Rekuperation mit Strom beispielsweise von der Ladesäule aufgeladen werden kann. Erst bei längeren, durchgängigen Fahrten haben diese Fahrzeuge eine schlechtere Klimabilanz als die Verbrenner, da der Verbrennungsmotor einspringt und aufgrund des zusätzlichen Gewichts der Batterie und der eingebauten Elektronik ein schwereres Fahrzeug antreiben muss. Häufig wird der Motor parallel damit beansprucht, die Batterie in Teilen wieder aufzuladen, wodurch sich zeitweise hohe Verbräuche ergeben können.

Um die Etablierung von batteriegestützter Elektromobilität zu fördern, hatte das BMWI im Februar 2020 den Umweltbonus für PHEVs, BEVs und FCEVs deutlich erhöht, sodass durch Bund und Hersteller PHEVs (bei Kohlenstoffdioxid-Emissionen weniger als 50 Gramm Kohlendioxid-Äquivalente pro Fahrzeugkilometer) und BEVs mit bis zu 6.750 bzw. 9.000 Euro subventioniert wurden.

Bereits ab 2023 wird die Regelung angepasst, sodass PHEVs aus der Förderung rausfallen und nur noch emissionsfreie Fahrzeuge, mit reduzierten Fördersätzen, gefördert werden: 4.500 bzw. 3.000 Euro auf Fahrzeuge mit einem Netto-Listenpreis von bis zu 40.000 bzw. 65.000 Euro. Ab Januar 2024 werden dann sogar nur noch Fahrzeuge bis zu einem Netto-Listenpreis von 45.000 Euro gefördert (z. B. sind aktuell überhaupt keine FCEV-Fahrzeuge zu diesen Konditionen verfügbar).

6.4 Batterieantrieb

Batterieelektrische Fahrzeuge (BEV = Battery Electric Vehicle), häufig als Elektroautos bezeichnet, sind Fahrzeuge, deren mechanische Energie durch einen Elektromotor bereitgestellt wird. Die dafür benötigte elektrische Energie wird in Batterien gespeichert. Diese tragen signifikant zu den Treibhausgasemissionen im Fahrzeugherstellungsprozess bei.

Speziell bei batterieelektrischen Bussen gibt es noch eine Unterscheidung zwischen Nachtladern (ON = Overnight-Charger) und Gelegenheitsladern (OC = Opportunity-Charger). Während BEV-ON-Busse über größere Batterien verfügen und nur nachts im Depot aufgeladen werden müssen, werden BEV-OC-Busse sowohl an den Endhaltestellen für ein paar Minuten als auch nachts im Depot geladen. Dies hat den Vorteil, dass die Busse mit kleineren Batterien ausgestattet werden können, was vor allem die Klimabilanz der Fahrzeuge verbessert.

Batteriefahrzeuge haben einen entscheidenden Nachteil: Die Kapazität ihrer Batterie wird stark von Umweltfaktoren beeinflusst. Bei Temperaturen unter zehn und über 40 Grad nimmt die nutzbare Batteriekapazität stark ab. Der Effekt wird durch die zusätzlich benötigte Energie für die Heizung – hier kann der Verbrennungsmotor die Abwärme des Motors benutzen – und die Klimaanlage verstärkt [28]. In München, wo die Durchschnittstemperaturen von Januar bis März bei ca. drei Grad liegen, ist dies von besonderer Relevanz. Ohne Heizung wird die Reichweite bei Temperaturen von -6,7 Grad Celsius um etwa zehn Prozent reduziert, bei eingeschalteter Heizung um 47 Prozent [29]. Die Weiterentwicklung von Feststoffbatterien soll in wenigen Jahren zu Reichweiten-Verbesserungen von 40 Prozent bis 80 Prozent führen [30].

6.5 Oberleitung

Oberleitungen können das Problem zu kurzer Reichweiten lösen, das bei batterieelektrischen Fahrzeugen auftreten kann. Durch Leitungen oberhalb der Fahrbahn sind Oberleitungsfahrzeuge in der Lage, den benötigten Strom direkt aus dem Stromnetz zu beziehen, und können so entlang der Infrastruktur lokal emissionsfrei fahren. Für Strecken außerhalb des Netzes dient entweder Strom in

Batterien oder Diesel als Energieträger, sodass die Flexibilität der Fahrzeuge gewährleistet wird. Es kann zwischen Batterie-Oberleitung (BEV-Oberleitung) und Hybrid-Oberleitung (HEV-Oberleitung) unterschieden werden.

Oberleitungen werden aktuell nur von Bussen und Lastkraftwagen verwendet, die zumeist auf fest definierten Strecken (beispielsweise Autobahnabschnitte oder feste Umläufe in der Stadt) zum Einsatz kommen. Für Busse existieren in Solingen schon seit den Fünfzigerjahren Erfahrungswerte mit HEV-Oberleitungen im Linienbetrieb [31], seit 2018 auch mit BEV-Oberleitungen [32]. Unter den Lastkraftwagen sind aktuell nur Pilotprojekte mit Hybrid-Oberleitungsfahrzeugen im Betrieb, beispielsweise auf der Teststrecke entlang der A5 in Südhessen [33]. Auch in Bayern sind sogenannte E-Highways im Gespräch [34].

Der Aufbau der Infrastruktur benötigt erhebliche Investitionen zudem wird das Stadtbild nachhaltig verändert. Außerdem sind die Fahrzeuge selbst vom Netz abhängig und erzielen die gewünschten Effekte wie lokale Emissionsfreiheit zunächst nur im definierten Raum der Infrastruktur.

6.6 Brennstoffzellenantrieb

Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV = Fuel Cell Electric Vehicles) sind ebenfalls elektrische Fahrzeuge. Die benötigte Energie wird initial nicht in Batterien, sondern in stofflicher Form in Wasserstoff gespeichert. Um diesen in elektrische Energie umzuwandeln, wird eine Brennstoffzelle verwendet (nichtsdestotrotz werden Batterien als Zwischenspeicher eingesetzt). Diese wandelt die chemische Energie des Wasserstoffs in elektrische Energie um. Als einziges Nebenprodukt entsteht dabei Wasser, sodass diese Fahrzeuge, ähnlich wie solche mit Batterieantrieb, als emissionsfrei gelten.

Wasserstoff weist mit 120 Megajoule pro Kilogramm im Vergleich zu Lithium-Ionen-Akkus eine deutlich höhere gravimetrische Energiedichte (Energie pro Gewicht) auf. Sie ist etwa 160-mal höher als die der aktuellen Batterien. Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff ist die volumetrische Energiedichte (Energie pro Volumen) jedoch sehr niedrig, weshalb der Wasserstoff unter hohem Druck im Fahrzeug gespeichert werden muss.

Die hohe gravimetrische Energiedichte von Wasserstoff führt dazu, dass der Brennstoffzellenantrieb vor allem bei energieintensiven Einsätzen interessant ist. Dazu gehört im Bereich des Straßenverkehrs vor allem der Schwerlastverkehr oder auch gewisse Sondernutzfahrzeuge.

Trotz der Vorteile von Brennstoffzellen gibt es einen entscheidenden Nachteil. Wird Wasserstoff durch Elektrolyse hergestellt, wie dies gerade bei grünem Wasserstoff der Fall ist, ist der Gesamtwirkungsgrad deutlich niedriger als beim Batterieantrieb [27] [28].

Brennstoffzellenfahrzeuge haben gegenüber batterieelektrischen Fahrzeugen den Vorteil, dass sie nicht so sensibel auf die Umgebungstemperatur reagieren. Ein Fahrzeug der Kompaktklasse verbraucht im Winter etwa zehn Prozent mehr, im Sommer hingegen zehn Prozent weniger Wasserstoff als im Durchschnitt.

Wie bereits in Kapitel 6.3 geschrieben gibt es zwar theoretisch eine Förderung für FCEV-Pkw, jedoch sind aktuell keine Fahrzeuge unter den Maximalgrenzen für die Listenpreise verfügbar.

6.7 Brennstoffzellenantrieb als Reichweitenverlängerung

FCEV-REX (FCEV Range Extender) sind ebenfalls Brennstoffzellenfahrzeuge, die zusätzlich mit einer größeren Batterie ausgestattet sind. Abhängig von der Fahrzeugausstattung kann dies die Reichweite des Fahrzeugs verbessern. Der Wasserstoff kann innerhalb weniger Minuten getankt und die Batterie zu Hause oder im Depot an der Ladeeinrichtung geladen werden, ähnlich wie ein Plug-In-Hybrid. Bisher haben FCEV-REX-Fahrzeuge vor allem bei Bussen Aufmerksamkeit erlangt, finden vereinzelt aber auch bei der Pkw-Klasse „SUV“ Anwendung.

7 Rahmen und Definitionen der Bewertung

Im Folgenden wird die Vorarbeit für die Bewertung der alternativen Kraftstoffe und Antriebstechnologien geleistet. Es werden Einsatzszenarien definiert, die unterschiedliche Anforderungen an Fahrzeuge haben, und Kriterien festgelegt, um zu analysieren, welche Kraftstoffe und Antriebstechnologien auch in Zukunft am besten für die jeweiligen Einsatzszenarien geeignet sind.

7.1 Fahrzeugklassen

Das Kraftfahrtbundesamt (KBA) definiert im „Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern“ [35] zahlreiche Fahrzeugklassen. Diese Studie wird auf die beiden Pkw-Klassen näher eingehen, die in München am bestands- bzw. neuzulassungsstärksten sind (siehe Abbildung 9):

» Kompaktklasse (Beispiele: VW Golf, Ford Focus) und
» SUVs und Geländewagen (gebündelt).

Die Flotte der Stadtwerke München im Jahr 2021 (Stand Juli) besteht aus 252 Gelenkbussen, 84 Solobussen und 57 Buszügen. Darüber hinaus verfügen Kooperationspartner über zusätzliche 128 Gelenkbusse, 129 Solobusse und 53 Buszüge [36]. Die hauptsächlich im städtischen Verkehr eingesetzten Gelenkbusse überwiegen mit knapp 54 Prozent und werden für den Stadtverkehr analysiert, wohingegen die Solobusse im Regionalverkehrsbetrieb betrachtet werden.

Des Weiteren werden Lastkraftwagen (Lkw) in die drei gängigen nach dem Gesamtgewicht differenzierten Fahrzeugklassen aufgeteilt:

» N1: bis zu 3,5 Tonnen schwere Lieferwagen (leichte Nutzfahrzeuge),
» N2: 3,5 Tonnen bis 12 Tonnen schwere Fahrzeuge zur Güterbeförderung,
» N3: Schwerlastfahrzeuge, ab 12 Tonnen Gesamtgewicht.

Die drei betrachteten Sondernutzfahrzeuge des städtischen Fuhrparks sind

» Abfallsammelfahrzeuge,
» Kehrmaschinen und
» Löschfahrzeuge.

Diese Fahrzeuge wurden gemeinsam mit den Verantwortlichen der Stadt München unter den Sondernutzfahrzeugen als die mit der jeweils größten Flotte und den meisten Nutzungsstunden identifiziert.

7.2 Definition der Einsatzszenarien

Die betrachteten Einsatzszenarien können in drei Kategorien eingeteilt werden. In der urbanen Mobilität vereint sich der Personenverkehr, der urbane Transport deckt den Handel und Güterverkehr ab, und die Spezialanwendungen sind ausgewählte Szenarien der Kommunalbetriebe.

7.2.1 Urbane Mobilität

Im Bereich der urbanen Mobilität werden unterschiedliche Einsatzgebiete von Personenkraftwagen und Bussen betrachtet, die sich in erster Linie in ihrer Umlauflänge bzw. zurückgelegten Strecke pro Tag unterscheiden. Für beide Pkw-Klassen (Kompaktklasse und SUV) werden die Szenarien *„Innerstädtische Kurzfahrten“* und *„Langfahrten“* analysiert. Dies sind zum einen Fahrten, die regelmäßig von Pendlern zurückgelegt werden und täglich unter 100 Kilometer liegen oder längere Standphasen haben, und zum anderen Langstreckenfahrten mit zurückgelegten Strecken größer als 100 Kilometer ohne längere Standphasen – z. B. touristische Fahrten.

Abbildung 9: Daten des Pkw-Bestands in München

Münchener KFZ-Bestand (links) und Neuzulassungen (rechts) im Jahr 2020 nach Fahrzeugklassen (Statistisches Amt München, Stand: Januar 2021). Ausgewählt wurden die bestands- und zulassungsstärksten Fahrzeugklassen. Dies führt zu der Auswahl der Kompaktklasse und SUV/Geländewagen für die weiteren Analysen.

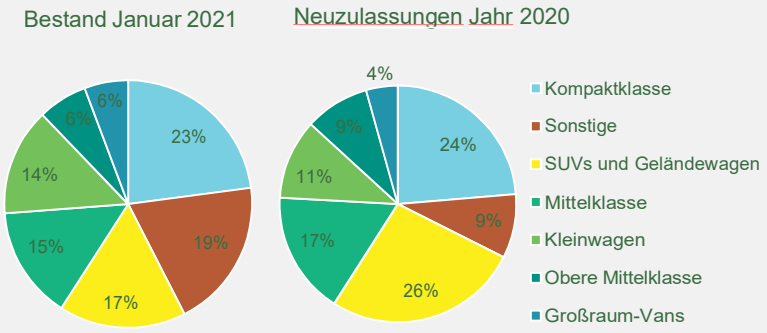


Abbildung 10: Übersicht der betrachteten Einsatzszenarien

	Fahrzeugtyp	Einsatzszenario	Mögl. Anwendungsgebiete
Urbane Mobilität	Pkw-Klassen (SUV und Kompaktklasse)	Innerstädtische Kurzfahrten *(≤100km/Tag oder längere Standphasen)*	Kurzstreckenpendler, Taxi, Carsharing, Einkaufsfahrten, Polizei
		Start und Ende von Langfahrten *(>100km/Tag oder kontinuierliche Fahrten)*	Langstreckenpendler, Ausflugsfahrten
	Solo- und Gelenkbusse	ÖPNV: Kleiner Umlauf (≤ 250km)	Innerstädtischer Busverkehr
		ÖPNV: Großer Umlauf (> 250km)	Überland- und Regionalverkehr
Urbaner Transport	Lieferwagen (N1)	Letzte Meile *(Geringer Umlauf und lange Standzeiten im Depot)*	Kurier-Express-Paket-Dienst (KEP), Handwerkerverkehr
	Schwere Nutzfahrzeuge (N2, N3)	Anlieferung Handel *(Innerstädtischer Schwerlasttransport)*	Warenan- und -auslieferung (z. B. Einzel- oder Großhandel)
Spezial-anwendungen	Kehrmaschine	Straßenreinigung *(Innerstädtisch, ca. 100km Umlauf, Reinigungs- und Saugsysteme)*	Straßenreinigung
	Abfallsammel-fahrzeuge	Abfallentsorgung *(Innerstädtisch, ca. 100km Umlauf, Lade- und Presssysteme)*	Abfallentsorgung
	Löschfahrzeuge	Feuerwehr *(Innerstädtisch, Kurzstrecke, Pumpsysteme)*	Feuerwehreinsätze, v. a. zur Brandbekämpfung

Bei den Bussen werden ebenfalls zwei Szenarien analysiert, die sich in der Umlauflänge der Linie unterscheiden. Im ersten Fall wird die Verwendung von Bussen im Stadtverkehr ausgewertet. Hier kann von Umläufen kleiner als 250 Kilometer pro Tag ausgegangen werden. Aufgrund der höheren Beförderungskapazität sind in diesem Szenario vor allem Gelenkbusse relevant. Da Solobusse hingegen vermehrt im Regionalverkehr eingesetzt werden, wird zusätzlich ein Einsatzszenario mit Umläufen von mehr als 250 Kilometer pro Tag betrachtet.

7.2.2 Urbaner Transport

Der städtische Transportverkehr kann in zwei Szenarien aufgeteilt werden. Die Belieferung von Haushalten mit Waren oder Dienstleistungen, zu der Kurier-Express-Paket-Dienste und der Handwerkerverkehr zählen, werden im Szenario *„Letzte Meile“* betrachtet. Hier werden die Fahrzeuge der Klasse N1 analysiert. Das zweite Szenario *„Anlieferung Handel“* rückt Lastkraftwagen der Klasse N2 und N3 in den Vordergrund. In diesem Szenario werden Waren durch Schwerlastfahrzeuge mit hohen Reichweitenanforderungen in die Stadt geliefert.

7.2.3 Spezialanwendungen

Im Bereich der Spezialanwendungen werden drei Einsatzszenarien unterschieden. Im Szenario *„Straßenreinigung“* kommen vorwiegend kleinere Kehrmaschinen zum Einsatz. Diese haben innerstädtische Umlauflängen von maximal 100 Kilometer pro Tag und Betriebsstunden von maximal acht Stunden. Neben dem Antrieb müssen die Reinigungs- und Saugsysteme betrieben werden.

Die Abfallsammelfahrzeuge, die für das Szenario *„Abfallentsorgung“* in der Stadt zum Einsatz kommen, benötigen zusätzliche Energie zum Betrieb der Lade- und Presssysteme. Die Fahrzeuge weisen Umlauflängen von bis zu 100 Kilometer pro Tag auf.

Im Szenario *„Feuerwehr“* werden Löschfahrzeuge zur Brandbekämpfung genutzt. Eine unzureichende Funktionsfähigkeit eines Fahrzeugs kann schwerwiegende Konsequenzen haben. Das Fahrzeug muss in kürzester Zeit einsatzbereit sein, die Pumpsysteme bei längeren Löscheinsätzen betreiben können und im Ernstfall auch größere Reichweiten abdecken.

7.3 Definition der Bewertungskriterien

Die verschiedenen Antriebstechnologien und Kraftstoffe werden in jedem Einsatzszenario mit Blick auf sechs verschiedene Kriterien bewertet (siehe Abbildung 11). Um die Bewertung nachvollziehbarer zu gestalten, werden für die einzelnen Kriterien Unterkategorien definiert, anhand

Abbildung 11: Übersicht der betrachteten Bewertungskriterien

Die umfassende Analyse der Kraftstoffe und Antriebstechnologien in den Einsatzszenarien erfordert neben der Betrachtung der Umweltaspekte auch die Betrachtung wirtschaftlicher, infrastruktureller und politischer Umstände.

derer ein Scoring vorgenommen wird (von null bis drei). Null steht für eine schlechte Bewertung und „in diesem Kriterium ungeeignet“. Der Score drei ist die beste Bewertung, die eine Technologie erhalten kann und steht für eine sehr gute Eignung in der jeweiligen Kategorie.

7.3.1 Klimabilanz

Die Klimabilanz berücksichtigt die Auswirkungen, die eine Antriebstechnologie auf die Umwelt im Sinne der Treibhausgasemissionen hat. Hier wird der gesamte Lebenszyklus des Kraftstoffes sowie der jeweiligen Antriebstechnologie in Bezug auf seine Klimabilanz analysiert.

WTW: Well-to-Wheel-Treibhausgasemissionen pro Fahrzeugkilometer

Kumulierter Energieaufwand: Energie, die zur Kraftstoffherstellung benötigt wird

7.3.2 Lokale Emissionsfreiheit

Bei der Verbrennung eines Kraftstoffes entstehen Abgas-Emissionen. Teile dieser Emissionen beeinträchtigen in direkter Art und Weise die Luftqualität der Städte. Der Ausstoß jedes Emissionstyps wird einzeln analysiert und erhält einen Score von 0 bis 3.

Bewertet werden jeweils die Emissionen von Kohlenstoffdioxid (CO_2), Stickstoffoxid (NO_x), Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (NMHC), Kohlenstoffmonoxid (CO), Ammoniak (NH_3) und Feinstaubpartikelmasse (PM), die bei der Verbrennung des Kraftstoffes entstehen. Hohe Emissionen können gesundheitsgefährdend wirken, daher gelten für sie auch Grenzwerte sowie so genannte Sektorziele. So ist im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) festgelegt inwieweit die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft sowie Abfallwirtschaft und Sonstiges ihre Emissionen bis 2040 senken müssen, gemessen in Emission in Millionen Tonnen CO_2-Äquivalent, um so den Anstieg der globalen Durchschnitttemperatur zu verlangsamen.

7.3.3 Marktverfügbarkeit

Um die Marktverfügbarkeit eines Fahrzeuges mit einer bestimmten Antriebstechnologie und einem Kraftstoff zu bewerten, werden der Technologiereifegrad des Kraftstoffes auf der einen und der des Antriebes auf der anderen Seite analysiert.

Technology Readiness Level (Kraftstoff): Quantifiziert die technologische Reife der Entwicklung des Kraftstoffes. Der Technologiereifegrad deckt die derzeitige Funktionstüchtigkeit im Szenario ab.

Technology Readiness Level (Antrieb): Integriert die Anzahl der verfügbaren Fahrzeugmodelle, den prozentualen Anteil des derzeitigen Bestandes sowie die Änderung der Bestände in den letzten fünf Jahren am Markt in eine Kennzahl. In dieser Kennzahl spielt neben den quantitativen Aspekten des Markthochlaufs zudem die qualitative Bewertung möglicherweise existierender Prototypen und deren möglichen Hochlauf (in den kommenden fünf, fünf bis zehn bzw. zehn bis 15 Jahren) eine Rolle.

7.3.4 Wirtschaftlichkeit

Das Kriterium der Wirtschaftlichkeit bewertet die ökonomischen Aspekte qualitativ. Bei der Anschaffung, Kraftstoffnutzung oder der Fördermittelverfügbarkeit gibt es erhebliche Unterschiede. Eine Anrechnung bestimmter Förderprogramme auf die einzelne Fahrzeugklasse ist nicht immer möglich.

Anschaffung und Wartung: Das Einsatzszenario wird mit Blick auf die Kosten der Fahrzeuge im gesamten Lebenszyklus (TCO = Total Cost of Ownership) analysiert, von der Anschaffung bis hin zur Wartung und Infrastruktur.

Kraftstoffnutzung: Kosten für die Kraftstoffnutzung auf aktuellem Stand.

Fördermittelverfügbarkeit: Für das Einsatzszenario wird die Landschaft aktuell verfügbarer und gegebenenfalls anstehender relevanter Förderprogramme auf regionaler, nationaler und europäischer Ebene ausgewertet.

7.3.5 Regionale Energieträgerverfügbarkeit

Ob ein Fahrzeug mit einem bestimmten Kraftstoff genutzt werden kann, hängt ganz maßgeblich von der kraftstoffspezifischen Infrastruktur ab. Neben der Tank-/Ladeinfrastruktur werden in dieser Kategorie regionale Produktionskapazitäten sowie die Unabhängigkeit von externen Faktoren analysiert.

Produktionskapazitäten: Beurteilt wird, ob der Kraftstoff in Deutschland, Bayern, im Münchner Umland oder gar in München produziert wird, und wenn ja, in welchen Mengen. Wenn es maximale Kapazitäten gibt, wird dies mitberücksichtigt. Faktoren für eine mögliche Beschränkung werden kurz erläutert.

Tank- und Ladekapazitäten: Betrachtet wird die absolute Zahl der Tank- und Ladesäulen in Deutschland und München – auch im Hinblick auf die Frage, ob die existierenden (verbreiteten) Strukturen genutzt werden können. Dieser Aspekt hat Auswirkungen auf die Geschwindigkeit und die Kosten, mit der Änderungen durchgesetzt werden können.

Regionalbezug und Unabhängigkeit von externen Faktoren im Herstellungsprozess: Die regionale Rohstoffverfügbarkeit im Umland von München wird für die Herstellung des Kraftstoffes ausgewertet. Ebenfalls relevant sind gegebenenfalls vorliegende natürliche Lagerstätten. Die Unabhängigkeit der Edukte der Kraftstoffe sowie des Stroms von externen wirtschaftlichen und politischen Faktoren wird ebenfalls betrachtet.

7.3.6 (Inter-)nationale Regulatorik

Für den Straßenverkehr existiert national und international eine große Anzahl an Vorgaben. Zu Bestandsquoten für die europäischen Länder, unzähligen Luftreinhaltungsprogrammen sowie Flottengrenzwerten für die Autobauer werden in den kommenden Jahren weitere Gesetze hinzukommen. Die Nachhaltigkeit und Emissionsfreiheit stehen im Mittelpunkt. Eine Abweichung von diesen Vorgaben kann zu hohen Strafzahlungen führen, weshalb die Vereinbarkeit der Fahrzeuge mit bestimmten Antrieben und Kraftstoffen mit der aktuellen bzw. schon absehbaren zukünftigen Regulatorik bewertet wird.

EU Green Deal (s. Abbildung 12): Im Rahmen dieses so genannten Europäischen Grünen Deals soll emissionsfreier Verkehr gefördert werden. Es steht vor allem der

Abbildung 12: Regulatorische Einblicke

Was sind der „European Green Deal“, „Clean Vehicles Directive“ und die Luftreinhaltungsprogramme genau?

Der **„European Green Deal“** [37] ist ein Konzept, mit dem die Europäische Union Europa bis 2050 als ersten Kontinent klimaneutral gestalten möchte. Für den gesamten Verkehr sieht es vor, 55% der Treibhausgase bis 2030 (**„Fit for 55“**) und 90% bis 2050 zu reduzieren. Erfolgen soll dies unter anderem durch die Anwendung des Emissionshandelssystems auf den Verkehr ab 2026, das Verbot von Verbrennungsmotoren bei neuen Pkw und leichten Nutzfahrzeugen ab 2035 und einem Ausbau der H_2-Tankstellen- und Ladesäuleninfrastruktur entlang TEN-V.

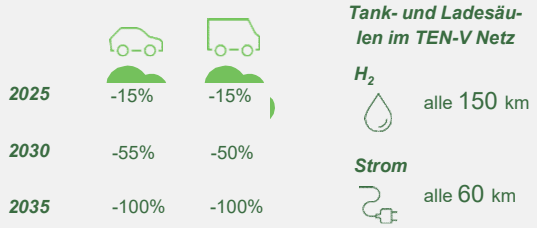


Abbildung a): *Konkretisierung der Dekarbonisierungsziele für Pkw- und LNF-Neuzulassungen und Maßnahmen in der Verkehrsinfrastruktur nach Fit for 55*

Die **„Clean Vehicles Directive“** [38] hingegen ist eine EU-Richtlinie zur Förderung sauberer und effizienter Fahrzeuge. Es handelt sich um verbindliche Ziele für die öffentliche Auftragsvergabe für emissionsarme Pkw, Lkw und Busse. An die das in Deutschland umgesetzte Gesetz müssen sich neben öffentlichen Akteuren aber auch bestimmte Dienstleister wie Paketdienste oder Stadtreinigung halten.

	Sauberes Fahrzeug (Werte in g CO_2/km)		Beschaffungsquoten bis 2026	bis 2031
Pkw	50	Ab 2026:	38,5 %	
Lkw N1	50	0	38,5 %	
Lkw N2/N3	Nutzung altern. Kraftstoffe (0,0 % fossile Herkunft)		10 %	15 %
Busse			22,5 %* 22,5 %**	32,5 %* 32,5 %**

*sauber **emissionsfrei

Abbildung b): *Clean Vehicles Directive – Definition sauberer Fahrzeuge und Beschaffungsquoten* [61]

Darüber hinaus legt die EU in der Luftqualitätsrichtlinie Immissionsgrenzwerte für bestimmte Luftschadstoffe fest, die nicht überschritten werden dürfen. Diese EU-Vorgaben wurden in die nationale Gesetzgebung implementiert. Dies hat vor allem gesundheitliche Gründe, da bestimmte Stoffe sogar krebserregend sein können.

Infrastrukturausbau alternativer Kraftstoffe und Antriebstechnologien im Vordergrund [37].

Clean Vehicles Directive (s. Abbildung 12 b): Es werden nationale Ziele der Beschaffung von „sauberen“ Fahrzeugen definiert. In zwei Referenzzeiträumen müssen bestimmte Bestands- und Neubeschaffungsquoten durch die europäischen Länder erfüllt werden [38].

Luftreinhaltung: Die europäischen Immissionsgrenzwerte für unterschiedliche Luftschadstoffe dürfen nicht überschritten werden. Es handelt sich z. B. um Immissionsgrenzwerte für Stickstoffdioxid (NO2) und Feinstaub (PM10 und PM2,5), um die Bevölkerung vor einer gesundheitsschädlichen Konzentration dieser Schadstoffe in der Umgebungsluft zu schützen. Werden Grenzwerte überschritten, sind Luftreinhaltepläne mit geeigneten Maßnahmen zu erstellen, um schnellstmöglich die Einhaltung der Grenzwerte sicherzustellen. Die Zuständigkeit für die Erstellung von Luftreinhalteplänen für das Stadtgebiet München ist zum 01.06.2021 von der Regierung von Oberbayern auf die Landeshauptstadt München übertragen worden.

Flottengrenzwerte: Regulierung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge in Europa. Es werden so genannte Flottengrenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge festgelegt, die die Automobilhersteller erfüllen müssen. Dabei handelt es sich um einen vorgegebenen Wert in g CO_2/km, der vom Durchschnitt aller in der EU neu zugelassenen Fahrzeuge nicht überschritten werden darf. Bei Überschreitung drohen den Herstellern monetäre Strafen in €/ g CO_2-Überschreitung pro zugelassenem Fahrzeug.

8 Bewertung von alternativen Kraftstoffen und Antriebstechnologien in verschiedenen Einsatzszenarien

Gemäß den in Kapitel 7.2 definierten Einsatzszenarien sowie den Bewertungskriterien aus Kapitel 7.3 (in den folgenden Abschnitten bei Berücksichtigung jeweils Fett markiert) werden im Folgenden die Bewertungsergebnisse für das Potential alternativer Kraftstoffe und Antriebstechnologien im urbanen Umfeld von Mobilität und Transport in der Stadt München vorgestellt.

8.1 Urbane Mobilität

Die Personenmobilität in München wird weitgehend durch Personenkraftwagen und den öffentlichen Personennahverkehr abgebildet. 97 % der täglichen Verkehrsleistung der Verkehrsträger entfallen auf die beiden Bereiche. Vor allem das Auto spielt mit 58 % eine bedeutende Rolle im städtischen Personenverkehr [39]. Um die zu Beginn angesprochenen ehrgeizigen Klimaziele der Stadt München zu erreichen, muss vor allem hier eine große Transformation stattfinden – dies betrifft sowohl den Individualverkehr mit Pkws als auch den ÖPNV.

8.1.1 Szenario „Innerstädtische Kurzfahrten eines Pkw der Kompaktklasse“

Ein Großteil der zurückgelegten Pkw-Fahrten in Deutschland sind Kurzfahrten. In der Studie „Mobilität in Deutschland 2017“ wurde aufgezeigt, dass 64 Prozent aller Fahrten kürzer als zehn Kilometer, 95 Prozent kürzer als 50 Kilometer und nur etwa ein Prozent länger als 100 Kilometer sind [40]. Entsprechend stellt das Einsatzszenario von Kurzfahrten der Pkw-Kompaktklasse einen guten Startpunkt für die Analyse dar.

In der Kompaktklasse waren im Jahr 2020 lediglich ein Prozent der Neuzulassungen in München und auch in Deutschland BEVs. Dazu kommen jeweils neun Prozent Hybrid- und zwei Prozent Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge. Wasserstofffahrzeuge spielen aktuell noch keine Rolle. Entsprechend decken Verbrenner auch weiterhin den Großteil des Bestandes (95 Prozent) ab.

Nichtsdestotrotz ist klar, dass für das Erreichen einer positiven **Klimabilanz** der Anteil an Verbrennern in den nächsten Jahren drastisch reduziert werden muss – bis diese irgendwann komplett aus dem System verschwinden. Die WTW-Klimabilanz bei BEVs der Kompaktklasse ist selbst mit dem aktuellen Strommix um 46 Prozent (siehe schematische Abbildung 13 b) besser als die für Benziner. Mit erneuerbarem Strom kann die Klimabilanz zudem auf knapp ein Viertel von der eines Benziners gedrückt werden. Für Biodiesel halbiert sich die WTW-Klimabilanz im Vergleich zum Diesel, bei synthetischem Diesel aus ausschließlich erneuerbaren Energien reduziert sich die Klimabilanz auf 25 Prozent.

Die **lokale Emissionsfreiheit** erreichen einzig BEVs und FCEVs. In Abbildung 14 b) ist zudem deutlich erkennbar, dass Gas-Verbrenner weniger Emissionen als Verbrenner produzieren. PHEVs schneiden einzig bei den Kohlenstoffdioxid-Emissionen besser als die anderen Verbrenner ab.

Darüber hinaus ist in der **(inter-) nationalen Regulatorik** klar geregelt, dass die lokalen Emissionen kurz- und mittelfristig auf null gesenkt werden müssen. Bereits heute greifen die verschärften Flottengrenzwerte von ca. 115 Gramm Kohlenstoffdioxid pro Kilometer für Kohlenstoffdioxid-Emissionen nach WLTP („Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure). 2030 werden diese sogar bei 50 Gramm Kohlenstoffdioxid pro Kilometer liegen. Zudem gilt gemäß der EU-Direktive „Fit for 55“, dass spätestens ab 2035 alle neuzugelassenen Fahrzeuge lokal emissionsfrei sein müssen (siehe Abbildung 12) – wobei die EU-Kommission die Verwendung von E-Fuels aktuell noch nicht gänzlich ausgeschlossen hat. Auch wenn die internationale Regulatorik mit Blick auf das Erreichen der Ziele des European Green Deals einen starken Fokus auf Elektro- und Wasserstoffmobilität setzt, werden in dieser Studie auch synthetische und Biokraftstoffe in der Bewertung berücksichtigt. Diese lösen nicht das Problem der lokalen Emissionen, stellen jedoch bei der Verwendung von grünem Strom eine klimafreundlichere Alternative dar (s. Abbildung 14 b). Aufgrund des steigenden Durchschnittsalters der Fahrzeuge [41], welches mittlerweile laut KBA bei über elf Jahren liegt, und auch in den nächsten Jahren ein Großteil des Bestandes durch bereits heute fahrende Verbrenner abgedeckt sein wird, können die synthetischen und Biokraftstoffe helfen, in einer Übergangsphase die Klimabilanz der Bestandsfahrzeuge zu verbessern.

Eine weitere Alternative für die Übergangsphase hin zu emissionsfreien Fahrzeugen sind die Hybriden (HEV und PHEV). Wie an der **Marktverfügbarkeit** bzw. den Neuzulassungszahlen erkennbar, werden diese Fahrzeuge aktuell für den privaten Gebrauch ähnlich stark nachgefragt wie reine BEVs (5.482 BEVs vs. 4.759 PHEVs). Nichtsdestotrotz haben diese nur einen geringen Vorteil bei Klimabilanz und lokalen Kohlenstoffdioxid-Emissionen. Insbesondere die am Markt verfügbaren PHEVs weisen im Vergleich zu den klassischen Verbrennern derzeit bei einigen Modellen einen höheren Kohlenstoffmonoxid-Ausstoß auf. Andere Alternativen existieren aktuell auf dem Markt praktisch nicht. Ähnlich wie Wasserstofffahrzeuge fahren in München beinahe keine CNG- und LPG-Fahrzeuge (unter einem Prozent). Während Wasserstoff zumindest perspektivisch aufgrund der lokalen Emissionsfreiheit sowie der regulatorischen Förderung und dem perspektivischen Ausbau von Infrastruktur eine größere Rolle spielen kann, ist dies bei den Erdgas-Kraftstoffen eher weniger der Fall – hier wurde bereits in der Vergangenheit ohne besonderen Erfolg versucht, einen Nachfragehochlauf mit entsprechender Infrastruktur zu initiieren (807 Tankstellen in Deutschland; siehe Abbildung 5).

Abbildung 13: Auswertung –Szenario „Innerstädtische Kurzfahrten eines Pkw der Kompaktklasse“

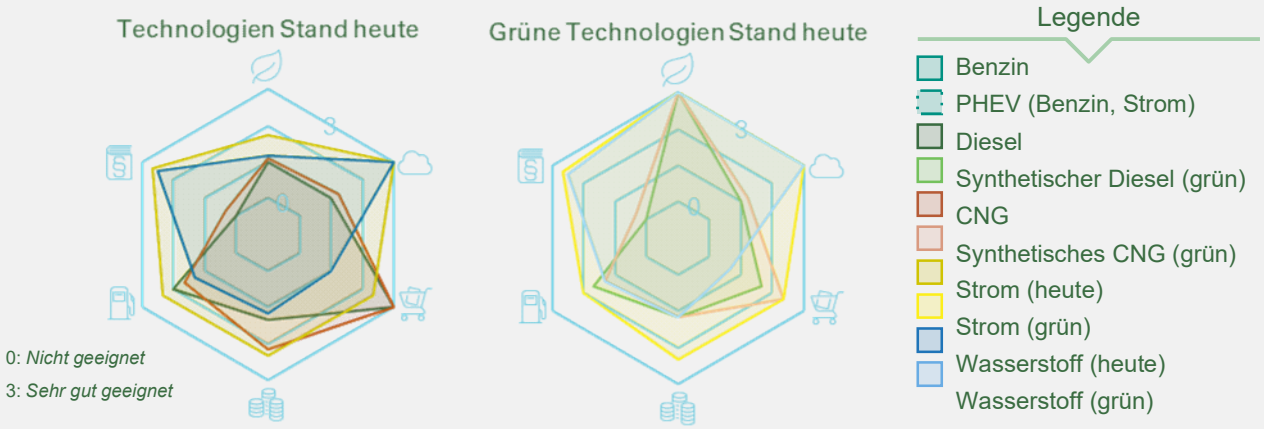


Abbildung a): *Bewertung der verschiedenen Kraftstoffe bei einem Kompaktwagen*

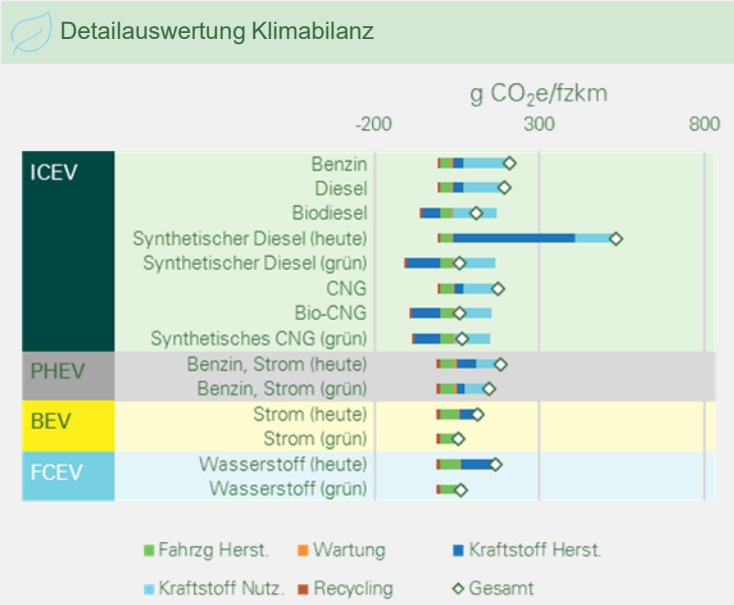


Abbildung b): *Detailauswertung der Klimabilanz. Synthetisch grüne und biogene Kraftstoffe spielen eine wichtige Rolle, und schneiden dementsprechend in der Klimabilanz auch gut ab.*

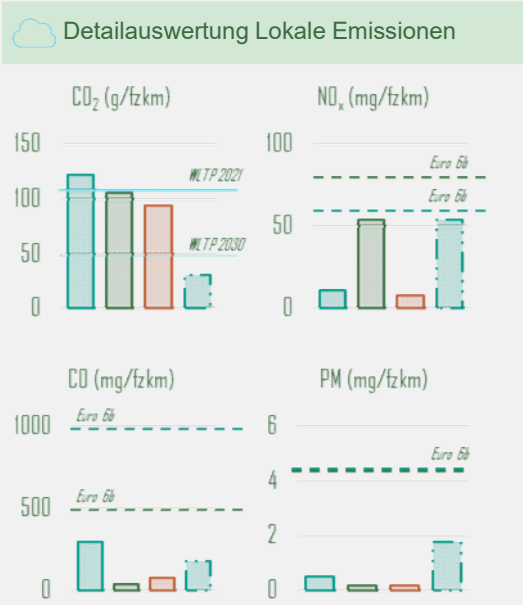


Abbildung c): *Detailauswertung der lokalen Emissionen. Verbrennungsmotoren schneiden in der Gesamtbewertung schlecht ab.*

Allgemein ist es so, dass die Infrastrukturverfügbarkeit und **regionale Energieträgerverfügbarkeit** insbesondere im Bereich der fossilen Kraftstoffe etabliert ist, wo der Kraftstoff zwar größtenteils aus dem Ausland importiert wird, aber flächendeckend zur Verfügung steht und getankt werden kann. Im Vergleich dazu gibt es aktuell weniger als zehn Wasserstofftankstellen in der Metropolregion München. Auch existieren noch keine Anlagen zur Produktion bzw. zum Energieträgeraufkommen von synthetischem Diesel. Lediglich in der batteriegestützten Elektromobilität wird Stück für Stück die notwendige Infrastruktur aufgebaut. Dies liegt insbesondere an der Förderung dieser Elektromobilität durch die Bundesregierung (z. B. für den Aufbau von Ladepunkten im Rahmen der Förderrichtlinie Elektromobilität, dem Förderprogramm Ladeinfrastruktur oder auch der Förderung von privaten Ladestationen an Wohngebäuden) sowie auch den Initiativen der Stadt München (z. B. Förderprogramm „München emobil“). In München gibt es mittlerweile über 1.100 öffentliche Ladepunkte [42], und zwischen November 2020 und Juli 2021 wurde in ganz Deutschland eine Bezuschussung für über 600.000 Ladepunkte für Wohngebäude beantragt, die KfW 440 listet in Ihren Förderberichten die Landeshauptstadt München mit 4.293 Anträgen zwischen November 2020 und Oktober 2021.

Während diese Entwicklung positiv zu bewerten ist, muss gleichzeitig berücksichtigt werden, dass insbesondere Mietern in Städten nicht immer eigene Stellplätze zur Verfügung stehen und selbst bei einer Verfügbarkeit die Genehmigung einer Ladesäule stets durch den Eigentümer erfolgen muss. Hinzu kommt, dass in Bayern und explizit München erneuerbare Energien relativ gesehen nur in geringem Maße lokal erzeugt werden. Das liegt zum einem am existierenden Nord-Süd-Gefälle – grüner Strom wird in Deutschland insbesondere im Norden hergestellt – sowie

auch an strengen regulatorischen Vorgaben; so verhindert in Bayern die 10-H-Regelung eine bedeutende Ausweitung der Erzeugung von Windkraftenergie. Zusätzlich gilt, dass in der Stadt München weder flächendeckend Biomasse noch viel Wasserkraft verfügbar ist. Zwar werden diese Punkte der positiven Entwicklung der Elektromobilität keinen Abbruch tun, jedoch könnten diese dafürsprechen, dass insbesondere auch Wasserstoffmobilität – aufgrund der positiven Eigenschaften in Energiespeicherung und Transport – in der Region München eine relevante Rolle einnehmen kann.

Hier scheitert es aktuell jedoch neben der Marktverfügbarkeit insbesondere auch an der **Wirtschaftlichkeit** von Wasserstoff im Pkw-Bereich. Wasserstofffahrzeuge sind aktuell lediglich im SUV-Segment verfügbar und kosten dort weit über 50.000 Euro (siehe Kapitel 8.1.3). Bei der Anschaffung von batteriebetriebenen Kompaktklasse-Fahrzeugen ist die Wirtschaftlichkeit durch unterschiedliche Subventionsprogramme gesichert – dies gilt aktuell auch noch für PHEVs. Neben den geringeren Kraftstoffkosten nähert sich auch der Anschaffungspreis immer mehr den gängigen Preisen für Dieselfahrzeuge bzw. Benziner an.

8.1.2 Szenario „Start und Ende von Langfahrten eines Pkw der Kompaktklasse“

Auch wenn lediglich ein Prozent aller Pkw-Fahrten auf Strecken größer als 100 Kilometer erfolgen, haben diese aufgrund der Distanzen einen hohen Einfluss auf die Gesamtfahrleistung (etwa 25 Prozent) [40]. Entsprechend muss auch der Aspekt der Reichweite und der Infrastrukturverfügbarkeiten für Langstreckenfahrten in einer gesamtheitlichen Bewertung berücksichtigt werden – insbesondere da hier oft auch Bedenken gegenüber Elektromobilität vorliegen.

Tatsächlich ist es so, dass die Reichweitenproblematik aufgrund fortschreitender Batterietechnologie und -kapazitäten immer mehr in den Hintergrund rückt. Beispiele hierfür sind z. B. der Tesla Model 3 oder auch der VW ID.3 mit Reichweiten (nach WLTP) über 500 Kilometer, wobei bei ADAC Tests Reichweiten zwischen 400 Kilometer und 500 Kilometer herauskamen [43]. Hinzu kommt, dass nicht nur in „Fit for 55“ vorgegeben ist, dass entlang des Hauptverkehrsnetzes TEN-V bis 2030 alle 60 Kilometer Schnellladesäulen, mit Ladeleistungen >100 Kilowatt, errichtet sein müssen, sondern auch Deutschland mit der Ausschreibung des Deutschlandnetzes bereits bis 2023 bis zu 1.000 Schnelladehubs aufbauen will.

8.1.3 Eigenheiten von SUVs auf Kurz- und Langstrecken

SUVs und Geländewagen sind in vielen Punkten ähnlich zu bewerten wie Kompaktklassewagen und unterscheiden sich insbesondere durch die Größe.

Während die **lokale Emissionsfreiheit** auch hier nur durch batterieelektrische und Brennstofffahrzellenfahrzeuge erreicht werden kann, schneiden aufgrund des größeren Gewichts und des größeren Luftwiderstandsbeiwerts SUVs in der **Klimabilanz** über alle Kraftstoffe und Antriebstechnologien hinweg tendenziell schlechter ab.

Wesentliche Unterschiede ergeben sich lediglich in der **Marktverfügbarkeit**. Für SUVs existiert aktuell anders als bei der Kompaktklasse bereits ein Serienfahrzeug, der Hyundai Nexo, das mit Wasserstoff angetrieben wird und an die 80.000 Euro in der Neuanschaffung kostet. Mercedes nahm seinen GLC F-Cell aufgrund geringer Chancen sogar wieder vom Markt und der Toyota Mirai ist ein Mittelklassefahrzeug und wird somit nicht in den in dieser Studie behandelten Fahrzeugklassen analysiert. Im Vergleich dazu wächst für BEV-SUVs der Markt so stark wie in der Kompaktklasse. Beispiele sind der Mercedes GLC, der Audi e-tron, der BMW iX und der VW ID.4. Es kann festgestellt werden, dass die Reichweiten sogar noch größer als beim Kompaktklassewagen sind und somit Langfahrten mit BEV-SUVs bereits jetzt möglich sind. Das liegt vor allem an den technischen Gegebenheiten eines SUVs und dem deutlich größeren Raum für eine Batterie im Fahrzeugboden.

Ähnlich wie bei der Kompaktklasse ist jedoch die **Wirtschaftlichkeit** von Brennstoffzellenfahrzeugen auch im SUV-Segment noch nicht gegeben. Neben der Ergänzung, dass Wasserstofffahrzeuge aktuell eher im SUV-

Zentrale Erkenntnisse –
"Innerstädtische Kurzfahrten eines Pkw der Kompaktklasse"& "Start und Ende von Langfahrten eines Pkw der Kompaktklasse"

- Flottengrenzwerte und Fit for 55 bedeuten „Aus“ des Verbrenners
- BEV-Kompaktklassewagen eindeutig am besten bewertet
- Die Verfügbarkeit von grünem Strom muss auch bei steigender Nachfrage gewährleistet sein
- Die ca. 1800 öffentlichen Ladepunkte in der Stadt München werden bei einem weiteren Hochlauf der BEVs nicht ausreichen [60]
- Subventionen und Förderprogramme, beispielsweise des BMVIs, existieren schon heute, um den Aufbau von Infrastruktur und die Etablierung von BEVs zu unterstützen
- „Fit for 55“ fördert den Ausbau der Lade- und Wasserstoffinfrastruktur entlang der Hauptverkehrsachsen Europas massiv
- Eine teilweise Umrüstung der Bestandsflotte der Verbrenner auf synthetische oder Bio-Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien nur bedingt möglich
- Wasserstoff stellt im Pkw-Segment aktuell keine Alternative dar, allerdings ist durch die hohen Subventionen Technologiepotential gegeben

Umfeld getestet werden, entsprechen die Ergebnisse der SUV-Analyse derer der Kompaktklasse.

Zentrale Erkenntnisse
„SUVs auf Kurz- und Langstrecken“

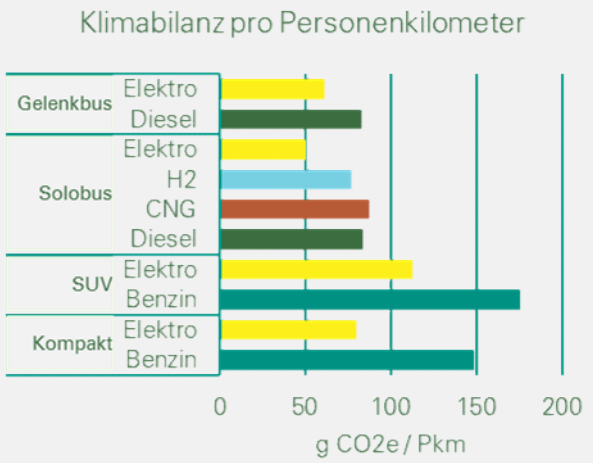
- Flottengrenzwerte und Fit for 55 bedeuten „Aus“ des Verbrenners
- SUVs weisen schlechtere Effizienzen im Vergleich zur Kompaktklasse auf – sind aber insbesondere als BEV verfügbar
- Batteriebetriebene SUVs im Vergleich zu anderen alternativen Antriebstechnologien am besten bewertet
- SUVs schneiden bei der Klimabilanz tendenziell schlechter ab als Kompaktklassewagen
- Die Verfügbarkeit von grünem Strom muss auch bei steigender Nachfrage gewährleistet sein
- Die ca. 1800 öffentlichen Ladepunkte in der Stadt München werden bei einem weiteren Hochlauf der BEVs nicht ausreichen [60]
- „Fit for 55“ fördert den Ausbau der Lade- und Wasserstoffinfrastruktur entlang der Hauptverkehrsachsen Europas massiv
- Eine teilweise Umrüstung der Bestandsflotte der Verbrenner auf synthetische oder Bio-Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien nur bedingt möglich
- Wasserstoff stellt im Pkw-Segment aktuell keine Alternative dar, allerdings ist durch die hohen Subventionen Technologiepotential gegeben

8.1.4 Szenario „ÖPNV: Kleiner Umlauf eines Gelenkbusses“

In der Stadt München kommen im innerstädtischen ÖPNV vorwiegend Gelenkbusse zum Einsatz. Im engmaschigen Haltestellennetz müssen die Busse jederzeit verfügbar sein und haben zwischen ihren Touren nicht viel Zeit. Für die innerstädtischen Umläufe, die weniger als 250 Kilometer pro Tag lang sind, können einige der betrachteten alternativen Antriebstechnologien die Reichweitenanforderungen erfüllen. Die Stadtwerke München betreiben zurzeit 252 Gelenkbusse; zehn dieser Busse sind bereits vollständig elektrifiziert und 62 erfüllen den EEV-Standard (Enhanced Environmentally Friendly Vehicle). Laut internen informationen sehen die SWM bis 2023 40 E-Busse und bis 2025 131 E-Busse (Solo- und Gelenkbusse) in der Flott vor.

Durch den Umstieg auf batterieelektrische Gelenkbusse können bei einem heutigen Kauf, über die Lebensdauer gerechnet, mindestens 31 Prozent der im Lebenszyklus verursachten Treibhausgasemissionen vermieden werden. Eine Reduktion der **Klimabilanz** von 38 Prozent im Vergleich zum Diesel ist möglich, wenn Gelegenheitslader (BEV-OC), in denen kleinere Batterien als bei Nachtladern (BEV-ON) eingebaut sind, verwendet werden (siehe schematische Abbildung 15 b). Die Overnight-Charger kommen auf eine Reduktion von 31 Prozent. Falls in Zukunft

Abbildung 14: Klimabilanz – Bus und Pkw Vergleich



Klimabilanz der einzelnen Verkehrsmittel pro Person. Berechnet man die heutige Klimabilanz auf einen einzelnen Fahrgast, lassen sich Pkw und Busse vergleichen. Hierbei wird ersichtlich, welche Rolle Solo- und Gelenkbusse in der urbanen Mobilität spielen.

ausschließlich grüner Strom verfügbar ist, sind mit BEVs sogar Einsparungen von mindestens 83 Prozent möglich. Neben BEV-Gelenkbussen wäre in München auch die Verwendung von Oberleitungs-, Brennstoffzellen- oder CNG-Bussen denkbar. Sie erzielen ebenfalls Well-to-Wheel-Klimabilanzreduktionen. Es kommt allerdings auch hier auf die Herkunft des Stroms bzw. des Gases an, wie stark diese Reduktion ausfällt. Synthetischer Diesel bzw. synthetisches CNG, grüner Wasserstoff sowie grüner Strom erreichen alle eine Reduktion um mindestens 70 Prozent.

Lokale Emissionsfreiheit erreichen nur BEVs, Oberleitungs-Busse und FCEVs. Beim zurzeit fast ausschließlich verwendeten Diesel überwiegen die Stickstoff-Emissionen, CNG-Gelenkbusse stoßen eine Menge Kohlendioxid aus (Abbildung 15 c).

Von der harten Linie, dass nur emissionsfreie Fahrzeuge ab 2035 zugelassen werden dürfen, rücken die **(inter-) nationalen Regulatoriken** bei Bussen ab. So setzt die Clean Vehicles Directive (CVD) beispielsweise das Ziel bei 32,5 Prozent emissionsfreien Fahrzeugen bis 2030 an (siehe Abbildung 12). Zusätzlich dürfen dann immer noch 32,5 Prozent „saubere Fahrzeuge“ zugelassen werden. Darunter zählen laut CVD zum Beispiel CNG-Busse, da diese deutlich weniger schädliche Gase emittieren als Diesel-Verbrenner.

Abbildung 15: Szenario „ÖPNV: Kleiner Umlauf eines Gelenkbusses“

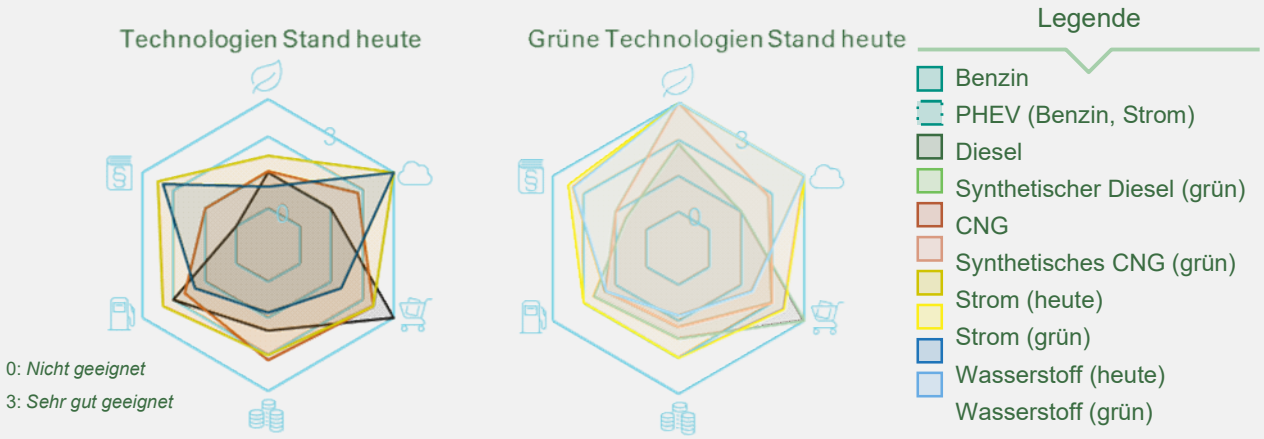


Abbildung a): *Bewertung der verschiedenen Kraftstoffe bei einem Gelenkbus*

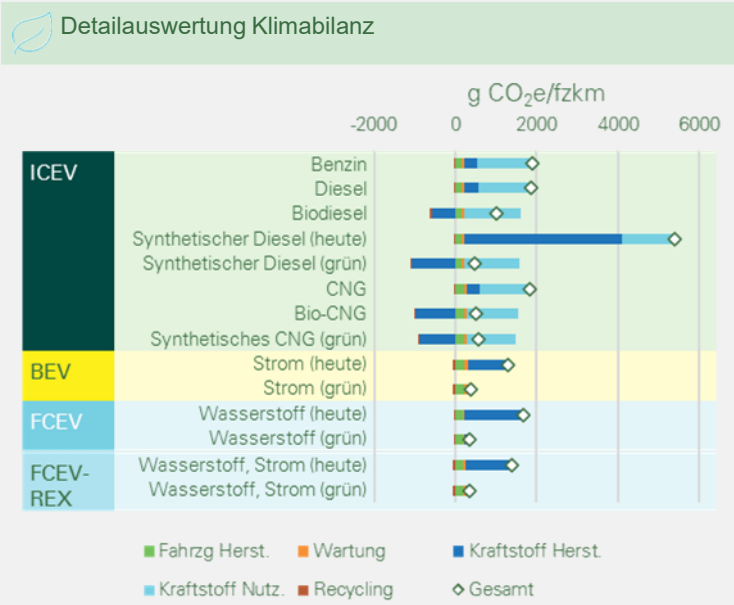


Abbildung b): *Detailauswertung der Klimabilanz. Synthetisch grüne und biogene Kraftstoffe spielen eine wichtige Rolle und schneiden dementsprechend in der Klimabilanz auch gut ab.*

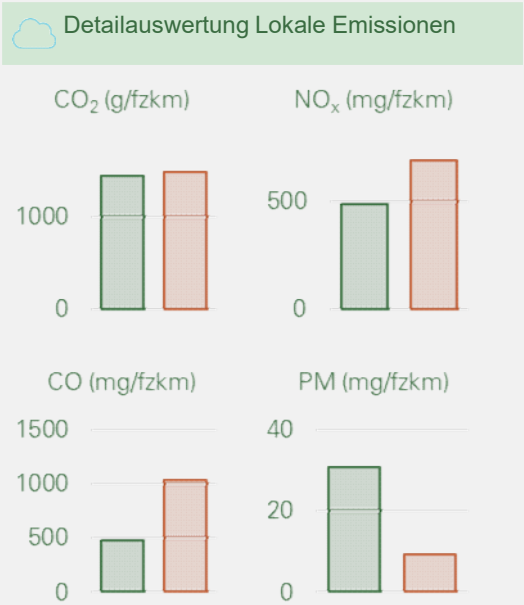


Abbildung c): *Detailauswertung der lokalen Emissionen. Grenzwerte sind nur mit einer Abgasnachbehandlung zu erreichen.*

Die **Marktverfügbarkeit** für all diese Antriebstechnologien ist gut bis sehr gut. MAN und auch Mercedes-Benz-Bus bieten zum Beispiel bei Gelenkbussen sowohl Diesel, CNG als auch batterieelektrische Varianten an. Anzumerken ist hier, dass für die batterieelektrischen Fahrzeuge im Gegensatz zu den Verbrennern Ladestationen im Depot notwendig sind, da die Ladungen schonend über Nacht erfolgen. Brennstoffzellenfahrzeuge befinden sich zurzeit kaum auf dem Markt, allerdings existieren hier Pläne und bereits Umsetzungen, beispielsweise von MAN und Mercedes-Benz-Bus, diese Technologie verstärkt anzubieten.

Die **Wirtschaftlichkeit** ist bei den Verbrennern schon seit langem und bei den BEVs jetzt auch gegeben, da die letzteren durch noch höhere Subventionen im Vergleich zum Diesel gefördert werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Preise für Brennstoffzellenbusse in der Zukunft sinken und auch hier mit Subventionen unterstützt wird, um die Flotten emissionsfrei zu bekommen.

Ein Aspekt, der immer wieder aufkommt, ist die aktuelle Tankstelleninfrastruktur für Wasserstoff. Bevor FCEV-Busse angeschafft werden, sollte eine ausreichende Abdeckung vorhanden sein. Diese ist mit fünf öffentlichen Tankstellen und keiner Depot-Tankstelle, die zwingen erforderlich wäre, in der Metropolregion München nicht gegeben. CNG-Tankstellen gibt es in der Stadt München etwas mehr, zwölf Stück, zudem sind sie gleichmäßig über das Stadtgebiet verteilt. Ladestationen können am Depot des Busunternehmens schnell nachgerüstet werden, wobei dabei beachtet werden muss, dass dadurch das Verteilnetz zusätzlich extrem belastet werden würde. Für Gelegenheitslader müssen zudem Supercharger an den Endhaltestellen errichtet werden.

Die Rohstoffabhängigkeiten zu anderen Ländern (siehe Kapitel 1) existieren aber auch in diesem Setting, sodass eine Bestbewertung bei der **regionalen Energieträgerfügbarkeit** nicht möglich ist.

Zentrale Erkenntnisse
„ÖPNV: Kleiner Umlauf eines Gelenkbusses“

- BEV-Busse können bereits heute auf kleinen Umläufen eingesetzt werden - hierfür muss insbesondere an Depots eine entsprechende Ladeinfrastruktur aufgebaut werden (neues Depot der SWM wird demnächst eröffnet)
- Auch FCEV-Busse sind, wenn auch weniger wirtschaftlich als BEV, verfügbar und erprobt - ein Ausbau der Infrastruktur muss erfolgen
- Der Wechsel zu lokal emissionsfreien Fahrzeugen im ÖPNV wird auch aus regulatorischen Gründen erfolgen - 2030 dürfen max. 35 Prozent der Neuanschaffungen fossile Verbrenner sein
- Eine teilweise Umrüstung der Bestandsflotte der Verbrenner auf synthetische oder Bio-Kraftstoffe aus erneuerbaren Energien nur beding möglich

8.1.5 Szenario „ÖPNV: Großer Umlauf eines Solobusses“

Im Regionalbetrieb werden in München auf größeren Umläufen primär Solobusse verwendet. Die antriebstechnologischen Unterschiede zwischen Solo- und Gelenkbussen sind klein, doch die Anforderungen durch den großen Umlauf von mehr als 250 Kilometer sehr hoch. Die Stadtwerke München haben zurzeit 84 Solobusse im Einsatz, wovon 26 auf EEV-Standard umgerüstet und 13 batterieelektrisch angetrieben werden.

Zwar können batterieelektrische Solobusse auch heute schon über 250 Kilometer lange Strecken zurücklegen, allerdings sind im Winter ambitionierte Reichweiten durch die zusätzlich erforderliche elektrische Heizung und die durch die kalten Umgebungstemperaturen reduzierte Batteriekapazität je nach Einsatzfall mit heutigen Batterien kaum zu erreichen. Wenn Oberleitungen auf großen Teilen der Strecke vorhanden sind, könnte das Reichweitenproblem für BEV-Busse im Winter gelöst werden. Der Einsatz von Oberleitungsbussen oder z. B. auch die Analyse des Mehrwerts von Gelegenheitsladern muss in enger Zusammenarbeit mit den Stadtwerken umlaufspezifisch separat analysiert werden.

Wirtschaftlichkeit und **Marktverfügbarkeit** erreichen zurzeit – wie bereits beim Gelenkbus – die Verbrenner und mit Subventionen auch die BEVs. Brennstoffzellenbusse sind bisher noch nicht wirtschaftlich.

Das hängt allerdings auch mit der **regionalen Energieträgerverfügbarkeit** zusammen. Die viel zitierte Tankstelleninfrastruktur für Wasserstoff fehlt. Nicht nur München mangelt es an grünem Wasserstoff als Kraftstoff und als Edukt der synthetischen Kraftstoffe und einer hundertprozentigen Produktion des Kraftstoffs Strom aus erneuerbaren Energien.

In den Kategorien **Klimabilanz** und **lokale Emissionsfreiheit** schneiden die Solo- tendenziell etwas besser als die Gelenkbusse ab. Lokale Emissionsfreiheit und die besten Klimabilanzen erreichen BEV- und FCEV-Solobusse, die mit grünem Strom bzw. Wasserstoff betrieben werden.

Daher versucht die **(inter-) nationale Regulatorik** die Flotten immer mehr in diese Richtung zu führen. Es gelten dieselben Richtlinien wie für die Gelenkbusse.

Für die langen Umläufe ist bis zum Hochlauf des Wasserstoffs und der Brennstoffzellen-Solobusse vermehrt auf die Verbrenner und die alternativen, klimafreundlichen Antriebe zu setzen. Erneuerbare Energien spielen hier eine große Rolle.

Zentrale Erkenntnisse
„ÖPNV: Großer Umlauf eines Solobusses“

- Der Einsatz von BEV-Bussen ist aufgrund der noch vorhandenen Reichweitenprobleme durch den Betrieb der Heizung/ Klimaanlage komplexer als auf der Kurzstrecke
- FCEV-Busse sind, wenn auch weniger wirtschaftlich als BEV, verfügbar und erprobt - ein Ausbau der Infrastruktur muss regional erfolgen
- Solobusse weisen tendenziell eine schlechtere Pro-Kopf Emissionsintensität vor im Vergleich zu gut ausgelasteten Gelenkbussen
- Der Wechsel zu lokal emissionsfreien Fahrzeugen im ÖPNV wird auch aus regulatorischen Gründen erfolgen - 2030 dürfen max. 35 Prozent der Neuanschaffungen fossile Verbrenner sein

8.2 Urbaner Transport

Der Last- bzw. Güterverkehr ist in den letzten Jahren – bis auf das Jahr 2020 aufgrund von Corona – stetig angestiegen, und auch für die folgenden Jahre wird ein weiterer Anstieg prognostiziert. Zudem prägen vor allem Lieferfahrzeuge das Stadtbild, und der Schwerlastverkehr verursacht erhebliche Geräuschemissionen.

8.2.1 Szenario „Letzte Meile“

Kurier-Express-Paket-Dienste (KEP) sowie auch der städtische Handwerkerverkehr nutzen leichte Nutzfahrzeuge der Klasse N1. Ihre Kunden sind meist Privatpersonen. Kurze Distanzen, maximal 250 Kilometer pro Tag, und ein festes Fahrzeugdepot für die KEP-Dienste zu Ruhezeiten sind die Haupttreiber dieser Szenarioanalyse. Die Angestellten bzw. Eigentümer der Handwerksbetriebe nehmen die Fahrzeuge häufig mit nach Hause. Bei BEVs stehen sie dort vor den gleichen ladeinfrastrukturellen Problemen wie sie private Pkw-Nutzer haben. Aktuell sind in diesem Szenario noch 98,2 Prozent der Fahrzeuge mit einem Dieselmotor ausgestattet – eine Größenordnung, die in Anbetracht der Verfügbarkeit geeigneter alternativer Antriebe ökologisch nicht sinnvoll ist. Eine Umstellung der Fahrzeugflotte ist hier zum Erreichen der Treibhausgasreduktionsziele einerseits notwendig, andererseits aber auch technisch und wirtschaftlich möglich. Die leichten Nutzfahrzeuge verhalten sich in den unterschiedlichen Bewertungskriterien ähnlich wie Pkw, da beispielsweise die regulatorischen Anforderungen vergleichbar sind.

So kann auch in diesem Szenario die **Klimabilanz** heute über den Lebenszyklus hinweg durch batterieelektrische Fahrzeuge um 39 Prozent verbessert werden, künftig, aufgrund des Hochlaufs der erneuerbaren Energien, so-

Abbildung 16: Szenario „Letzte Meile“

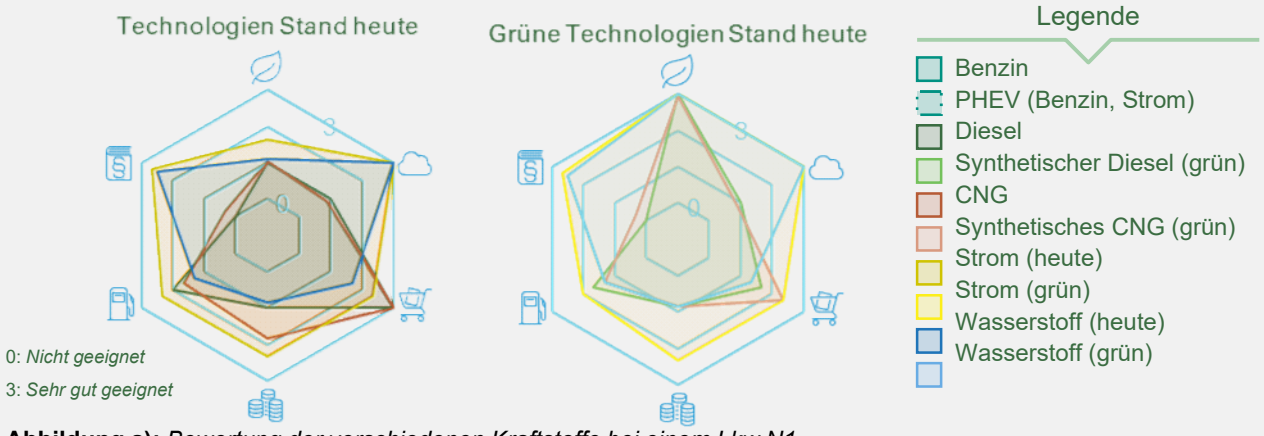


Abbildung a): *Bewertung der verschiedenen Kraftstoffe bei einem Lkw N1*

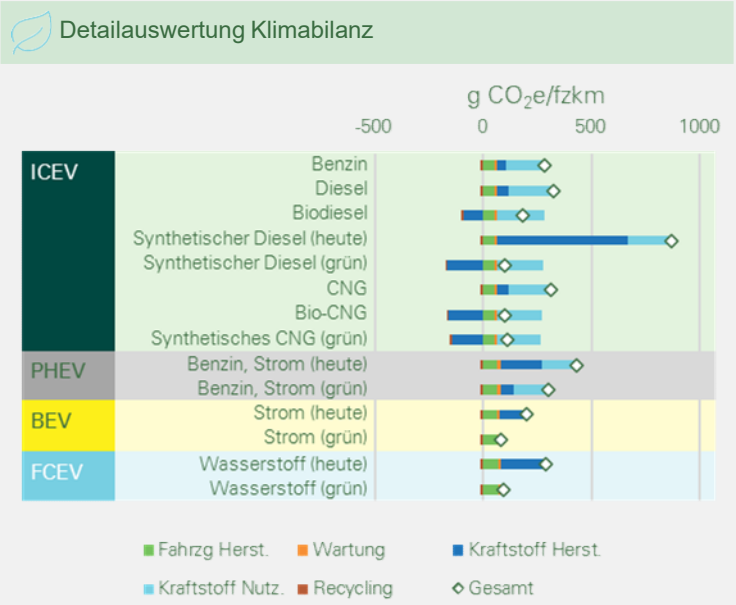


Abbildung b): *Detailauswertung der Klimabilanz. Synthetisch grüne und biogene Kraftstoffe spielen eine wichtige Rolle, und schneiden dementsprechend in der Klimabilanz auch gut ab.*

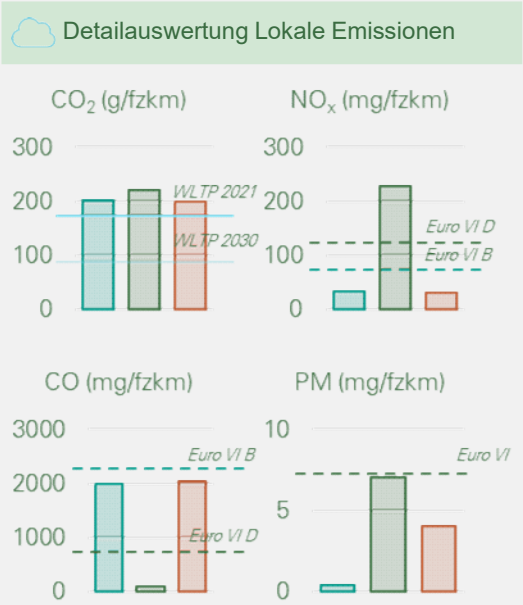


Abbildung c): *Detailauswertung der lokalen Emissionen, beispielhaft an einem Lkw N1 der Klasse III (zulässige Gesamtmasse >1760 kg)*

gar um mindestens 75 Prozent. In Zukunft können bei einem grünen Strommix ähnliche Werte auch mit Brennstoffzellenfahrzeugen erreicht werden (siehe Abbildung 16).

Folgt man der **(inter-) nationalen Regulatorik**, sind ab 2035 nur Neuzulassungen von batterieelektrischen sowie Brennstoffzellenfahrzeugen erlaubt – wobei die EU-Kommission die Verwendung von E-Fuels auch nach 2035 noch nicht gänzlich ausgeschlossen hat. Dies erfolgt durch eine schrittweise Reduktion der Flottengrenzwerte (siehe Abbildung 12).

Die dann noch vorliegende Bestandsflotte, zu denen einige Dieselfahrzeuge gehören werden, wird durch Nutzung kohlenstoffdioxid-neutraler Kraftstoffe wie synthetischem Diesel, Biodiesel oder auch der jeweiligen Gas-Äquivalente klimaneutraler. Aus grünem Strom hergestellter synthetischer Diesel ermöglicht eine Reduktion der WTW-**Klimabilanz** von über 68 Prozent Kohlendioxid-Äquivalente im Vergleich zum fossilen Diesel (siehe schematische Abbildung 16 b). BEV und FCEV besitzen bei grünem Strom ebenfalls eine deutlich bessere Klimabilanz.

Die **lokale Emissionsfreiheit** würde im Fall der Diesel- bzw. Gas-Äquivalente allerdings nicht erreicht werden.

Nur auf synthetische Kraftstoffe zu setzen, ist aus **wirtschaftlicher** Sicht nicht sinnvoll, denn die durch den Verbrennungsmotor verursachten hohen Wartungskosten sowie der teure Kraftstoff führen zu höheren Gesamtkosten, sodass synthetische Kraftstoffe nur zum klimafreundlicheren Betrieb der Bestandsflotte geeignet sind. Batterieelektrische Fahrzeuge hingegen haben zwar Anschaffungskosten, die 44 Prozent höher sind als beim Diesel, doch Einsparungen herrschen bei der Wartung und der Kraftstoffnutzung, sodass sich die Fahrzeuge gemeinsam mit der staatlichen Förderung rechnen. Brennstoffzellen sind dagegen in der Anschaffung noch zu teuer.

Batterieelektrische Fahrzeuge erfahren im N1-Sektor einen Hochlauf am **Markt**. Beispiele hierfür sind z. B. der Mercedes eVito oder der Renault Master Z.E.. Die Nachteile in ihrer Reichweite und Ladezeit können durch eine mögliche regelmäßige nächtliche Ladung im jeweiligen Depot und eine Beschränkung der Umlauflängen auf maximal 250 Kilometer kompensiert werden. Schwierigkeiten können sich noch im Winter in Einsatzgebieten ergeben, in denen die Fahrzeuge tagsüber mehrfach längere Standzeiten aufweisen, wie dies bei Handwerkern der Fall sein kann. Bei jeder längeren Standzeit muss das Fahrzeug wieder vollständig erwärmt werden, was die Reichweite des Fahrzeugs, zusätzlich zu den anderen Folgen der Kälte, verkürzt. Wenn aber die entsprechenden Unternehmen in eine Ladeinfrastruktur auf dem Betriebsgelände bzw. am Parkplatz der Fahrzeuge investieren und die Stadt München die Lademöglichkeiten speziell an frequentierten Haltepunkten der letzten Meile verbessert, ist diese lokal emissionsfreie Technologie sinnvoll einsetzbar. Auch Automobilkonzernen können hier gefragt sein, zusätzliche Ladestationen zu installieren, um den größten Kritikpunkt bei der Nutzung der BEVs weiter abzuschwächen. CNG- und Brennstoffzellenfahrzeuge sind dagegen noch nicht so breit verfügbar, vor allem beim FCEV ist noch kein Hochlauf in den nächsten Jahren absehbar.

Wenn einem Fahrzeug über Nacht ein Stellplatz mit Lademöglichkeit garantiert werden kann, Reichweiten im Winter nicht zu groß sind und am Stellplatz eine Batterieladung möglich ist, geht in Zukunft kein Weg an BEVs vorbei. Die Gesamterkenntnisse, auch bezogen auf die **regionale Energieträgerverfügbarkeit**, decken sich weitestgehend mit den Ergebnissen von Personenkraftwagen.

Zentrale Erkenntnisse
„Letzte Meile“

- Auch im N1-Segment steht der Verbrenner vor dem „Aus“, da lokale Emissionsfreiheit zurzeit nur mit Strom zu erreichen ist
- BEVs sind bereits marktreif und können aufgrund geringer täglicher Fahrstrecke und langer Standzeiten in den Betrieb integriert werden
- FCEVs werden aus Gründen der Wirtschaftlichkeit kurz- bis mittelfristig keine echte Alternative zu BEVs darstellen
- CNG und synthetische oder Biokraftstoffe werden voraussichtlich nicht - oder nur für die Transformation der Bestandsflotte - eingesetzt werden
- Beim weiteren Hochlauf benötigt die Stadt und die Region intelligente Ladestrategien, um die Entstehung von Lastspitzen zu verhindern
- Hier kann der Einsatz von Vehicle to Grid, um das Stromnetz zu unterstützen, sinnvoll sein
- Die Verfügbarkeit von grünem Strom in Randzeiten (nachts) muss geklärt werden
- Unterstützung für Unternehmen um Depots mit Wallboxen / Ladestationen ausstatten hilfreich
- Möglichkeiten schaffen, damit Fahrzeuge von kleineren Handwerksunternehmen auch zu Hause geladen werden können

8.2.2 Szenario „Anlieferung Handel mit einem Lkw N2“

Die Nutzung von Lastkraftwagen zwischen 3,5 Tonnen und 12 Tonnen Gesamtgewicht, die beispielsweise Waren aus einem Zentrallager an Geschäfte in der Innenstadt liefern, hat andere Vorzeichen als der Letzte-Meile-Verkehr mit N1-Fahrzeugen. Es wird davon ausgegangen, dass in diesem Szenario ebenfalls jedem Fahrzeug ein Platz in einem Depot garantiert ist. Die Distanzen, die diese Fahrzeuge teilweise auch außerhalb der städtischen Umgebung auf Autobahnen zurücklegen, können mehrere hundert Kilometer betragen.

99,8 Prozent der deutschlandweit 350.000 zugelassenen N2-Nutzfahrzeuge fahren im Jahr 2021 mit einem Verbrennungsmotor. Bundesweit sind weniger als 100 Hybridfahrzeuge und Plug-In-Hybride zugelassen und erfuhren in den letzten Jahren auch keinen wahrnehmbaren positiven Trend. 400 BEVs und auch sehr geringe Bestandszahlen bei Brennstoffzellenfahrzeugen verdeutlichen die derzeitige Abhängigkeit vom Verbrennungsmotor im Schwerlastverkehr.

Die langsamere Dekarbonisierung des Schwerlastverkehrs lässt sich auch an der aktuellen **internationalen Regulatorik** ablesen. So werden im European Green Deal bzw. in „Fit for 55“ außerhalb der allgemeingültigen Dekarbonisierungsziele des Verkehrssektors keine konkreten Vorgaben an den Schwerlastverkehrs genannt. Lediglich in der Clean Vehicles Directive wird quantifiziert,

Abbildung 17: Szenario „Anlieferung Handel mit einem Lkw N2“

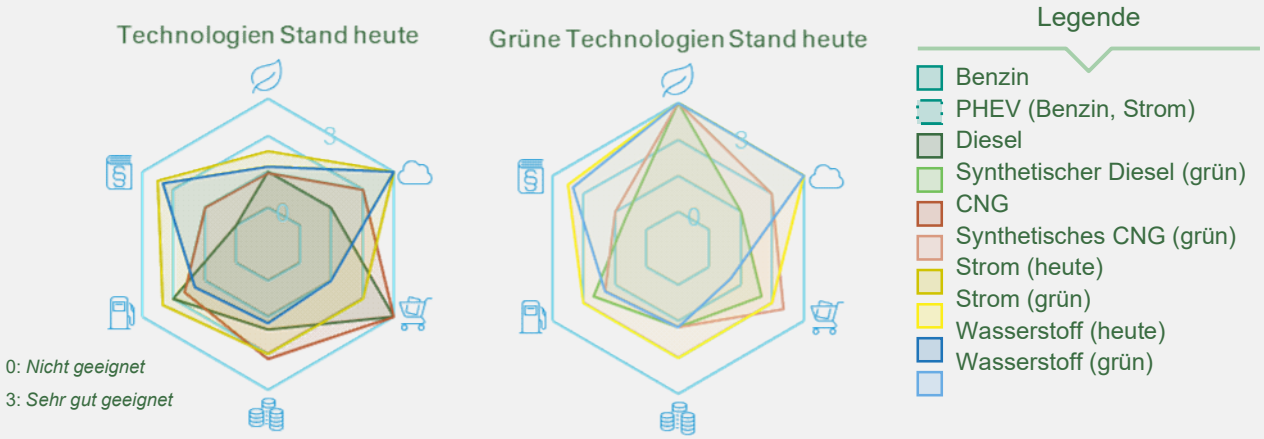


Abbildung a): *Bewertung der verschiedenen Kraftstoffe bei einem Lkw N2*

Detailauswertung Klimabilanz

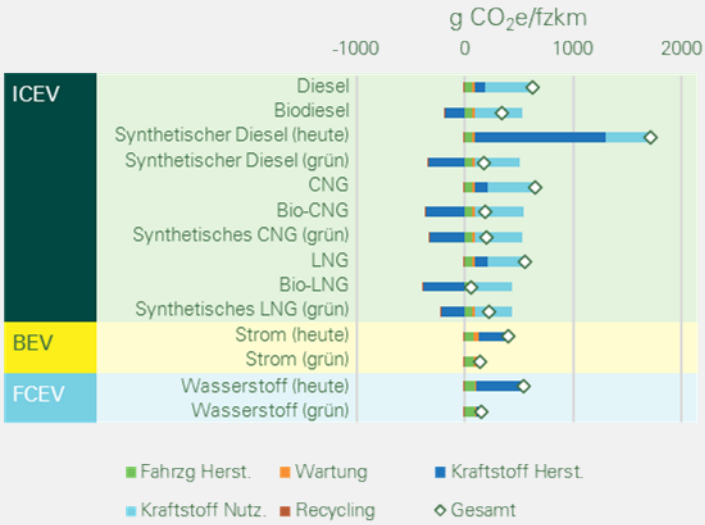


Abbildung b): *Detailauswertung der Klimabilanz. Synthetisch grüne und biogene Kraftstoffe spielen eine wichtige Rolle, und schneiden dementsprechend in der Klimabilanz auch gut ab.*

Detailauswertung Lokale Emissionen

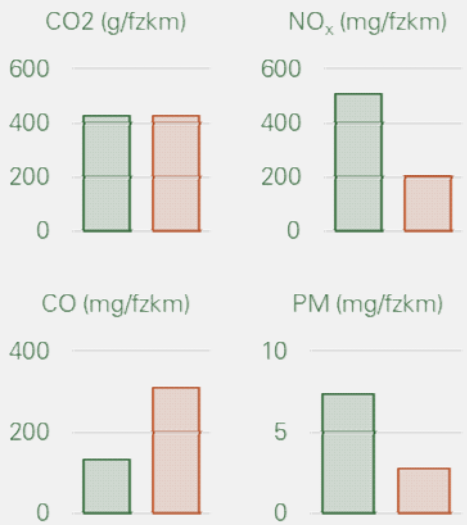


Abbildung c): *Detailauswertung der lokalen Emissionen. Gas-Verbrenner emittieren deutlich weniger Stickstoffe und Feinstaub.*

dass für Lkw, die schwerer als 3,5 Tonnen sind, Beschaffungsquoten alternativer Kraftstoffe von zehn Prozent (15 Prozent) zwischen August 2021 und Ende 2025 (ab 2026 bis Ende 2030) eingehalten werden sollen. Alternative Kraftstoffe beinhalten dabei jedoch nicht nur die emissionsfreien Energieträger Strom und Wasserstoff, sondern auch Erdgas, synthetische Kraftstoffe und Biokraftstoffe – ohne Zumischung.

Ein weiterer Punkt ist die geringe **Wirtschaftlichkeit** der alternativen Kraftstoffe und auch der fehlenden **Marktverfügbarkeit** von neuen Technologien. Hier fangen die großen Hersteller wie z. B. MAN, Mercedes, Scania oder Volvo zurzeit (2021) langsam an, Modelle auf den Markt zu bringen. Bis zu 4,25 Tonnen existiert bereits vereinzelt ein Serienangebot, allerdings ist die Anschaffung eines Brennstoffzellen- oder BEV-Lkws aktuell um ein Vielfaches teurer (mindestens viermal bei FCEVs bzw. mindestens dreimal bei BEVs) als die eines vergleichbaren Verbrenners. Hinzu kommt, dass bei BEV-Fahrzeugen aufgrund des hohen Transportgewichts und der großen Reichweitenanforderungen – auch zu kalten Jahreszeiten – existierende Batteriekapazitäten nicht ausreichen. Der Erfolg von BEV-Lkw ist somit abhängig vom technologischen Fortschritt bei Batterien, dem kurzfristigen Aufbau eines flächendeckenden Schnellladenetzes, (siehe auch Abbildung 17, zu den regulatorischen Vorgaben in „Fit for 55“) und der z. B. unterstützenden Maßnahmen wie Oberleitungen. Analog dazu muss ein entsprechender Infrastrukturaufbau auch im Bereich Wasserstoff erfolgen. Hierzu gibt es z. B. über die verschiedenen HyLand-Projekte [44], die teilweise auch auf die Metropolregion München fokussieren, konkrete Initiativen.

Um die Dekarbonisierung im Schwerlastverkehr zu unterstützen, spielen anders als bei den Pkw und N1-Fahrzeugen somit die weiteren alternativen Kraftstoffe eine relevante Rolle. Auch wenn die **lokale Emissionsfreiheit** durch CNG oder synthetische Kraftstoffe nicht erreicht werden kann, haben beide Kraftstoffe deutliche Vorteile gegenüber dem klassischen Diesel. N2-CNG-Lkws stoßen deutlich weniger Stickstoffoxide, Nichtmethanwasserstoffe und Feinstaub aus (siehe Abbildung 17 c).

Während die WTW-**Klimabilanz** der CNG-Fahrzeuge keine großen Verbesserungen aufweist, bieten hier die synthetischen Kraftstoffe entsprechende Vorteile (siehe Abbildung 17). Eine Reduktion von mindestens 50 Prozent sind in jedem klimafreundlichen Szenario möglich.

Zentrale Erkenntnisse
„Anlieferung Handel mit einem Lkw N2“

- Aktuell gibt es keine marktreifen Alternativen zu fossilen Kraftstoffen, sodass die Dekarbonisierung des Schwerlastverkehrs langsamer voranschreiten wird als im ÖPNV und Pkw-Segment
- Auch der regulatorische Druck ist aktuell noch gering
- Um BEV-N2-Lkw marktreif zu machen, sind weitere Fortschritte bei den Batteriekapazitäten notwendig - Oberleitungen sich (noch) nicht etabliert
- Teure FCEV-Lkw lösen das Problem der Reichweite, benötigen jedoch einen Aufbau der Infrastruktur
- CNG, LNG und synth. Kraftstoffe haben ihre Relevanz, können aber maximal Übergangslösungen sein
- Synthetische oder Bio-Kraftstoffe aus grünem Strom können maximal Übergangslösungen darstellen
- FCEVs und teilweise BEVs werden aufgrund ihrer Technologiereife erst mittelfristig großflächig eingesetzt werden können

8.2.3 Eigenheiten von einem Lkw N3 im urbanen Transport

Schwere Nutzfahrzeuge der Klasse N3 werden auf langen Strecken eingesetzt - mit täglich zurückgelegten Distanzen von bis zu 800 Kilometer und Ankunftsort im urbanen Umfeld. Ihr zusätzlich höheres zulässiges Gesamtgewicht von mindestens 12 Tonnen verschärft die Schwierigkeiten, die bei alternativen Antrieben des Lkw N2 vorherrschen. Die Erkenntnisse zur Klimabilanz und der lokalen Emissionen sind ähnlich zu denen des Lkw N2, die Werte fallen aufgrund des höheren Gewichts jedoch flächendeckend etwas höher aus.

Die benötigte Energie für den Betrieb eines N3-Lkw stellt ein Hemmnis für batterieelektrische Fahrzeuge dar. Neben den bereits angesprochenen geringen Reichweiten und langen Ladezeiten reduziert das Gewicht der Batterien die Nutzlast der Fahrzeuge erheblich. Die Einführung von Oberleitungen kann gerade für Fahrzeuge dieser Größenordnung das Problem schwerer Batterien lösen, doch ist damit ein erheblicher Infrastrukturaufwand verbunden.

Stattdessen können auch Brennstoffzellenfahrzeuge Abhilfe leisten. Allerdings mangelt es in Deutschland an der Verfügbarkeit und der Wirtschaftlichkeit von grünem Wasserstoff, einem klimaneutralen Kraftstoff. Der European Green Deal versucht die (regionale) Verfügbarkeit sowie die Wirtschaftlichkeit mit Subventionen zu unterstützen. Hier gilt, wie bereits beim vorherigen Szenario, dass die Wasserstoffinfrastruktur entlang der Hauptverkehrsachsen subventioniert wird, über die im Wesentlichen die Anlieferung des Handels erfolgt. Dies gilt nach der Regulatorik (z. B. Fit for 55) auch für LNG-Infrastruktur, wobei der Anteil an Gasfahrzeugen im Schwerlastverkehr bisher konstant gering geblieben ist. Stattdessen können ähnlich wie bei den N2-Fahrzeugen synthetische Kraftstoffe – bei ausreichender Verfügbarkeit – eine deutlich nachhaltigere Alternative darstellen. Allgemein unterscheiden sich in der Klimabilanz N3-Schwerlastfahrzeuge nicht stark von N2-Fahrzeugen, ebenso bei der lokalen Emissionsfreiheit. Die absoluten Werte skalieren je nach Fahrzeugmodell unterschiedlich stark nach oben.

Zentrale Erkenntnisse
„Anlieferung Handel mit einem Lkw N3“

- Aktuell gibt es keine marktreifen Alternativen zu fossilen Kraftstoffen, sodass die Dekarbonisierung des Schwerlastverkehrs langsamer voranschreiten wird als im ÖPNV und Pkw-Segment
- Auch der regulatorische Druck Richtung Zero Emission ist aktuell geringer als bei Pkw
- Die absoluten Klimabilanzwerte der N3-Fahrzeuge sind naturgemäß höher als bei N2-Fahrzeugen
- BEV-N3-Lkw haben neben den Reichweitenproblemen auch ein Nutzlastproblem, da das Gewicht der Batterien das Zuladungsgewicht mindert
- Oberleitungs-Lkw sind (noch) nicht etabliert
- Teure FCEV-Lkw lösen das Problem der Reichweite, benötigen jedoch einen Aufbau der Infrastruktur
- CNG, LNG und synth. Kraftstoffe haben ihre Relevanz, können aber maximal Übergangslösungen sein
- FCEVs und teilweise BEVs werden aufgrund ihrer Technologiereife erst mittelfristig großflächig eingesetzt werden können

8.3 Spezialanwendungen

Neben den Zwecken der Personenmobilität und des Güterverkehrs werden in Städten auch vermehrt Fahrzeuge für Spezialanwendungen eingesetzt. Diese sogenannten Sondernutzfahrzeuge – für die Stadt München werden Kehrmaschinen, Abfallsammelfahrzeuge und Löschfahrzeuge betrachtet – enthalten typischerweise zusätzliche Funktionalitäten, sodass insgesamt mehr Energie verbraucht wird. Die Bewertung der drei Szenarien ist in Abbildung 18 dargestellt.

8.3.1 Szenario „Straßenreinigung“

In der Stadt München werden vor allem Kleinkehrmaschinen vom frühen Morgen bis zum frühen Nachmittag eingesetzt; typischerweise wird eine Fahrt pro Tag getätigt, es existieren aber auch Fälle des Zweischichtbetriebs. Durchschnittlich kommen die Münchner Kehrmaschinen auf eine Nutzungsdauer von 5,5 Stunden pro Tag und haben dabei zusätzlichen Energieaufwand für die Reinigungssysteme an Bord. Die durchschnittliche Lebensdauer beträgt ca. 7 Jahre bzw. etwa 10 000 Betriebsstunden.

Für Kehrmaschinen gelten die gängigen Euro VI Normen für „Non-road mobile machinery“ (**regulatorische Rahmenbedingungen)**.

Um aus Gründen der Klimafreundlichkeit und Luftreinhaltung in Städten trotzdem Alternativen zu Diesel-Kehrmaschinen zu finden, gab es z. B. in Stuttgart und Ludwigsburg in der Vergangenheit Versuche, Plug-In-Hybride zu etablieren. Allerdings verbesserte sich die Kapazität der verbauten Batterien so schnell, dass der **Markt** bereits auf rein batterieelektrische Fahrzeuge setzt. Aufgrund der kurzen Betriebsdauer können sie ohne große Einschränkungen eingesetzt werden und nach der täglichen Nutzung am Depot aufgeladen werden. Durch ausreichende Ladeleistung am Depot sollte zudem sichergestellt werden, dass Pausen im Zweischichtbetrieb für die Aufladung ausreichen.

Mehrere Anbieter (z. B. Kärcher oder Boschung) bieten diese batterieelektrischen, **lokal emissionsfreien** und geräuscharmen Maschinen bereits an. Es ist anzumerken, dass vor allem Kompaktkehrmaschinen bereits elektrifiziert zu erhalten sind und es im Kleinkehrmaschinen-Segment noch an Angeboten mangelt.

Die **Klimabilanz** dieser BEVs - und auch von einer bereits existierenden FCEV-Kehrmaschine wird nur dann sehr gut, wenn Strom aus erneuerbaren Energien eingesetzt wird.

Die Produktion von grünem Wasserstoff hinkt hinterher, sodass zurzeit nur batterieelektrische Kehrmaschinen

Zentrale Erkenntnisse
„Straßenreinigung“

- Eine Umstellung der Flotte auf batterieelektrische Fahrzeuge ist – unter Berücksichtigung des Schichtbetriebes - bereits heute möglich. Fahrzeuge und der Infrastrukturaufbau sollten gefördert werden.
- Durch die Verfügbarkeit von Wasserstofffahrzeugen sollten Kehrmaschinen als Sondernutzfahrzeuge mit potenzieller Wasserstoffnachfrage in (sektorübergreifenden) Wasserstoffprojekten berücksichtigt werden.

eine **wirtschaftliche** Alternative sind. Hier liegt der Anschaffungspreis allerdings immer noch 150 Prozent über dem der Dieselfahrzeuge.

Ein Bau einer Wasserstoff-Tankstelle in Depotnähe oder von Superchargern an den Depot-Stellplätzen würde die Bewertung bei der **regionalen Energieträgerverfügbarkeit** erhöhen.

8.3.2 Szenario „Abfallentsorgung“

Abfallsammelfahrzeuge werden in der Stadt München vom frühen Morgen bis zum frühen Nachmittag eingesetzt. In dieser Zeit wird typischerweise eine Fahrt getätigt, und dabei werden ca. 65 Kilometer zurückgelegt. Auch wenn die täglichen Einsatzzeiten ähnlich zu denen der Kehrmaschinen sind, so benötigen Abfallsammelfahrzeuge aufgrund ihrer Größe und ihres Gewichts sowie der Lade- und Presssysteme wesentlich mehr Energie.

Der Abfallwirtschaftsbetrieb München (AWM) betrieb für eine kurze Zeit zwei Hybrid-Fahrzeuge als Testprojekte und Alternative zu den bisher vorherrschenden reinen Diesel-Fahrzeugen. Diese HEVs wurden allerdings aufgrund des hohen Schadbestandes nach kurzer Zeit wieder an den Hersteller zurückgegeben. Zum Zeitpunkt der Studienerstellung wurden von der AWM batterieelektrische Fahrzeuge beschafft. Ein FCEV ist bereits im Einsatz, genauso wie zehn Dieselfahrzeuge mit batterieelektrisch betriebenem Aufbau. Aufgrund des hohen Gewichts muss bei batterieelektrischen Abfallsammelfahrzeugen eine große Batterie eingesetzt werden, deren Eigengewicht dementsprechend hoch ist. Das wiederum verringert die Nutzlast – das Gesamtgewicht ist gesetzlich vorgegeben – und bringt Einschränkungen beim Einsatz hinsichtlich der Achslasten und Lastverteilungskurven mit sich.

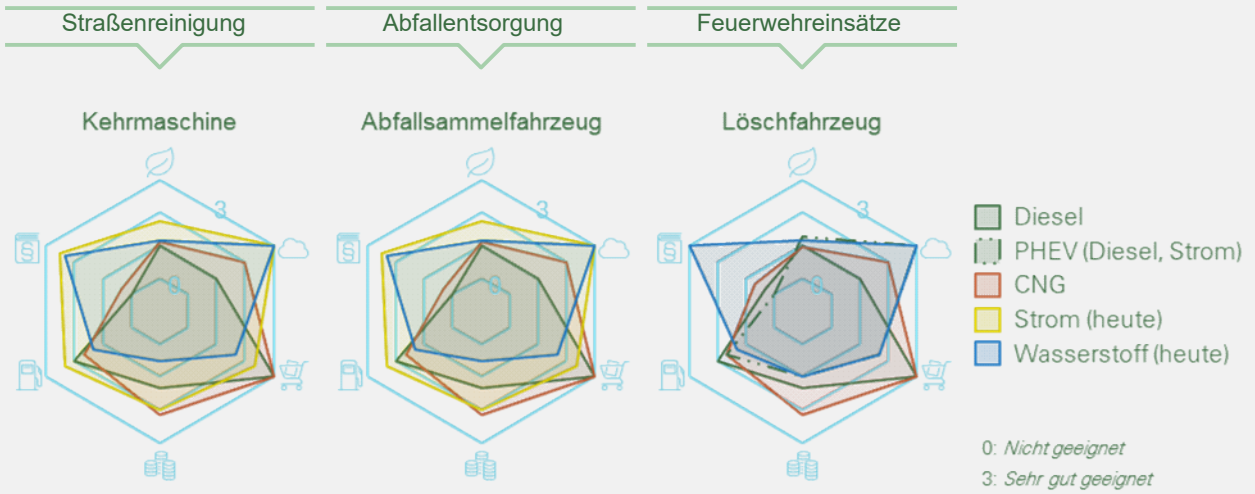
Eine **internationale Regulatorik** existiert nicht, allerdings hat die Abfallwirtschaft München bereits im Jahr 2020 das erste batterieelektrische Müllauto zum Shuttlen von Containern in ihre Flotte integriert.

Die einzige weitere Antriebsart neben BEV, die keine **lokalen Emissionen** aufweisen, ist der Wasserstoffantrieb. Erdgas-Müllsammelfahrzeuge stoßen zwar lokal weniger Kohlenstoffdioxid und Feinstaub aus, hundert Prozent emissionsfrei sind diese Fahrzeuge allerdings nicht. Erdgas-Müllsammelfahrzeuge werden seit den 90er Jahren in München genutzt.

Die Abdeckung Münchens für diese drei alternativen Kraftstoffe ist nur für CNG gegeben, wobei auch hier Kritik von Seiten des Abfallwirtschaftsbetriebs München laut wurde, da die Abdeckung durch zwölf Tankstellen nicht als ausreichend angesehen wird [45]. Während die **regionale Energieträgerverfügbarkeit** mit einer H_2-Tankstelle am Depot besser bewertet werden würde und auch Ladestellen an den Stellplätzen einen positiven Ausschlag in diese Richtung geben würden, ist für CNG die Herkunft sehr relevant.

Mit fossilem CNG bleibt die **Klimabilanz** in diesem Szenario ähnlich schlecht wie bei fossilem Benzin.

Abbildung 18: Szenarien der Spezialanwendungen



Während sich Abfallsammelfahrzeuge ähnlich wie schwere Nutzfahrzeuge der Klasse N3 verhalten, sieht die Situation für Feuerwehreinsätze ganz anders aus – batterieelektrische Fahrzeuge wurden aufgrund der hohen Anforderungen an Löschfahrzeuge nicht betrachtet, dahingehend könnten besonders Plug-In Hybride, die so ausgestattet sind, dass der Verbrennungsmotor lediglich bei längeren Einsätzen einspringen muss. Spezialanwendungen sind emissionsspezifisch schwächer reguliert als andere Fahrzeugklassen, die Bewertung der Regulatorik richtet sich hier also nicht an den Status quo, sondern was anhand bisheriger Beobachtungen in Zukunft erwartet werden könnte.

Die Firma Faun bietet bereits wasserstoff- und batterieelektrische Müllsammelfahrzeuge an. Die Preise sind zurzeit aber noch doppelt bis viermal so hoch wie für Verbrenner. Erdgas-Müllsammelfahrzeuge sind im Vergleich zum FCEV und BEV deutlich günstiger auf dem **Markt** zu erwerben. Mit möglichen staatlichen Subventionen für den Neuerwerb ausschließlich lokal emissionsfreier Fahrzeuge kann die **Wirtschaftlichkeit** dieser Fahrzeuge gesteigert werden.

Zentrale Erkenntnisse
„Abfallentsorgung“

- Die Stadt München testet bereits ein batterieelektrisches Fahrzeug und wird die Ergebnisse des Tests als Entscheidungshilfe bei der Wahl des zukünftigen Flottenmix' verwenden
- Wasserstoff, Strom und CNG sind, hergestellt aus erneuerbaren Energien bzw. Biomasse, sehr gute Äquivalente zum Diesel, wobei die Technologie vor allem für FCEVs und BEVs deutlich günstiger werden muss, damit eine Anschaffung für die Betreiber ökonomisch sinnvoll wird
- CNG wird bereits vom Abfallwirtschaftsbetrieb verwendet, allerdings existieren dort noch immer Infrastrukturprobleme

8.3.3 Szenario „Löschfahrzeuge“

Der gesetzliche Rahmen für Löschfahrzeuge verlangt eine jederzeit mögliche Betankung bzw. Ladung des Fahrzeugs am Einsatzort, um bei zeitintensiven Einsätzen nicht auf Tankstellen in der Umgebung des Einsatzorts angewiesen zu sein. Zudem existieren Anforderungen an maximale Fahrzeuggewichte. Auf dem Weg zur Dekarbonisierung kann neben synthetischem und Bio-Diesel auch grüner Wasserstoff eine klimafreundliche Kraftstoffalternative sein. Da auch für Löschfahrzeuge eine höhere Wasserstoff-Tankstelleninfrastruktur notwendig ist und München bei den fossilen und synthetischen Kraftstoffen abhängig von Importen ist, erhält kein Kraftstoff die beste Bewertung für die **regionale Energieträgerverfügbarkeit**. Rein batterieelektrische Fahrzeuge fallen aufgrund dieser Rahmenbedingungen, der potenziell langen Strecken und der wichtigen Verfügbarkeit aus der Betrachtung des Szenarios, werden allerdings in Pilotprojekten bei kurzen Einsätzen in Deutschland getestet.

Die **Wirtschaftlichkeit** ist bei FCEVs ein großes Problem, da Fahrzeuge auf dem Markt mehr als doppelt so teuer sind wie die äquivalenten Verbrenner. Daher wird beispielsweise in Niedersachsen die Anschaffung mit 50 Prozent bezuschusst. Sollte es diese Förderung für Bayern und insbesondere München geben, würde einiges für den Betrieb dieser Fahrzeuge sprechen.

Die **Marktverfügbarkeit** für alternative Antriebe ist bisher eingeschränkt. Allerdings haben Firmen wie die Albert Ziegler GmbH Wasserstoff als zukünftigen Kraftstoff für Feuerlöschfahrzeuge identifiziert und führt erste Machbarkeitsstudien durch.

Diese sind die einzigen Fahrzeuge, die keine **lokalen Emissionen** aufweisen und die betrieblichen Anforderungen erfüllen.

Zudem haben sie unter Verwendung von grünem Wasserstoff auch eine der besten WTW-**Klimabilanzen**. Die 99 Löschfahrzeuge, die zurzeit von der Feuerwehr München betrieben werden, verwenden alle den Kraftstoff Diesel. Bei durchschnittlichen Preisen um die 500.000 Euro für die Verbrenner und mehr als doppelt so viel für die H_2-Alternative wäre es sehr kostspielig, die gesamte Flotte in kurzer Zeit umzurüsten. Rosenbauer hat in Kooperation mit Volvo Penta Ende 2020 an Berlin, Amsterdam und Dubai jeweils ein hybrides Feuerlöschfahrzeug geliefert. Diese Fahrzeuge haben für kurze Distanzen geringe Emissionen, diese erhöhen sich aber mit der Betriebszeit deutlich.

Aktuell besteht keine weitere **(inter-) nationale Regulatorik**, die die Zulassung dieser Fahrzeuge beschränkt, sodass der Druck zur Umstellung nicht immens groß ist. Daher ist es denkbar, für diesen, relativ lang prognostizierten, Prozess in Richtung der lokalen Emissionsfreiheit der Sondernutzfahrzeuge synthetischen und Biodiesel zu verwenden. Diese Kraftstoffe können zwar nicht den gesamten Bedarf decken, reduzieren die Klimabilanz allerdings erheblich.

Zentrale Erkenntnisse
„Löschfahrzeuge“

- BEV-Löschfahrzeuge sind zurzeit für lang dauernde Einsätze nicht geeignet und fallen somit aus der Betrachtung
- Für FCEV-Löschfahrzeuge existieren die bekannten Probleme der Wirtschaftlichkeit und der schwachen Tankstelleninfrastruktur
- Hybrid-Fahrzeuge haben auf kurzen Distanzen sehr geringe Emissionen, die sich mit ihrer Betriebszeit jedoch deutlich erhöhen
- Synthetischer Diesel und Biodiesel können maximal eine Übergangslösung sein

8.4 Abschließende Bewertung für die Stadt München

Die Stadt München fokussiert bereits seit einigen Jahren durch verschiedene Initiativen und Förderprogramme auf den Hochlauf der (batteriegestützten) Elektromobilität. Dies passt zu den Ergebnissen der Analyse, die aufzeigen, dass schon heute BEVs in vielen Einsatzszenarien in der Bewertung am besten abschneiden. Insbesondere im

Pkw-Segment gibt es aktuell keine vergleichbaren, nachhaltigen Alternativen in der Neuanschaffung. Während HEVs und PHEVs nur kleine Vorteile gegenüber dem klassischen Verbrenner aufweisen, scheitert die Brennstoffzelle aktuell an der Wirtschaftlichkeit und Marktverfügbarkeit. Mit Blick auf die ambitionierten Münchener Ziele, bereits bis 2025 80 Prozent der Verkehrsleistung im Stadtgebiet durch abgasfreie Kraftfahrzeuge, den ÖPNV sowie Rad- und Fußverkehr abzubilden, kommt der Elektromobilität eine umso wichtigere Rolle zu. Neben der Förderung von E-Fahrzeugen und (Schnell-)Ladesäulen ist es hier insbesondere wichtig, einfache Lösungen für Mieter zu finden, die keinen eigenen Stellplatz zur Verfügung haben – z. B. durch die flächendeckende Verfügbarkeit von öffentlichen Ladesäulen, ausreichend Lademöglichkeiten bei Supermärkten und lokalen Unternehmen.

Auch wenn Wasserstoff als Antriebstechnologie noch nicht wirtschaftlich ist und praktisch keine Pkw verfügbar sind, bietet der Kraftstoff trotzdem Vorteile gegenüber Strom – insbesondere in der Energiespeicherung und durch die höhere Energiedichte. Perspektivisch kann es vorteilhaft sein, an anderer Stelle aus grünem Strom hergestellten Wasserstoff zu beziehen. Daher wird im Süden von Deutschland die Rolle von Wasserstoff allgemein relevant sein – wobei es auch hier Ausbaubedarf im Netz gibt. Im Verkehrssektor ergeben sich die Einsatzgebiete insbesondere im ÖPNV, beim Schwerlasttransport sowie gegebenenfalls bei Sondernutzfahrzeugen. Hier ist es relevant, erste Erfahrungen zu sammeln (z. B. im Rahmen der HyLand-Projekte) und zeitnah eine adäquate Infrastruktur aufzubauen – so wie es auch in „Fit for 55“ gefordert wird. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass auch in der Wasserstoffproduktion auf Nachhaltigkeit geachtet werden muss und der Fokus auf der Erzeugung von grünem Wasserstoff liegen sollte.

Zwar sind Strom und Wasserstoff die Energieträger der Zukunft in allen Einsatzszenarien, jedoch muss auch berücksichtigt werden, dass Bestandsflotten nicht von heute auf morgen auf BEV oder FCEV umgestellt werden können. Entsprechend bieten synthetische Kraftstoffe Potentiale, durch Umrüstung der Bestandsflotte die Klimabilanz von Verbrennern deutlich zu verbessern. Auch wenn die lokalen Emissionen dadurch nicht reduziert werden können, kann dieser Kraftstoff bei der Nutzung grünen Stroms praktisch die Klimabilanz eines batterieelektrischen Fahrzeuges erreichen – jedoch bei deutlich geringere Energieeffizienz. Jedoch ist aktuell davon auszugehen, dass lediglich ein Prozent des heutigen Dieselbedarfs 2030 durch E-Diesel abgedeckt werden kann und dieser dann insbesondere für den Schwerlastverkehr verwendet wird.

Als letzte Alternative stehen aktuell bereits CNG-, LNG- und LPG-Fahrzeuge inklusive Infrastruktur sowohl im Pkw, ÖPNV- als auch Lkw-Segment zur Verfügung. Zwar können diese teilweise geringere lokale Emissionen aufweisen (z. B. Stickstoffoxid), jedoch verbessern diese fossilen Kraftstoffe die Klimabilanz nicht maßgeblich. Hinzu kommt, dass die Bestände segmentübergreifend um maximal ein Prozent liegen und eine höhere Marktdurchdringung aktuell nicht absehbar ist.

Entsprechend wird der Fokus in den nächsten Jahren insbesondere auf dem weiteren Hochlauf der batteriegestützten Elektromobilität sowie der Etablierung von Wasserstoff als Energieträger liegen, um langfristig lokal emissionsfreie und zugleich auch bilanziell klimafreundliche – bei entsprechender Verwendung von grünem Strom – Technologien zu verwenden. Die Transition hin zu diesem langfristigen Ziel wird durch verschiedene Übergangstechnologien begleitet werden. Kurzfristig werden hierzu vor allem Hybride verwendet werden, mittelfristig bei Erhöhung der Produktionskapazitäten ggfls. auch synthetische E-Fuels. Gasfahrzeuge werden kontinuierlich, aber vermutlich weiterhin in geringem Ausmaß eingesetzt werden.

9 Ausblick

Die in dieser Studie erarbeiteten Inhalte dienen vor allem dafür, einen Überblick über die Potentiale alternativer Kraftstoffe in spezifischen Einsatzszenarien zu geben und stellen keine Analyse im Sinne einer vollständigen Ökobilanz dar. Dennoch wurden im Rahmen der Bewertung aus ökologischer Sicht insbesondere die Klimabilanz in Kohlendioxid-Äquivalenten sowie eine Auswahl an lokalen Emissionen betrachtet. Diese Ergebnisse können in einem nächsten Schritt die Grundlage für die Erstellung einer ausführlichen Ökobilanz bilden. Gemäß DIN EN ISO 14040 & 14044 ist dafür ein vierstufiges Verfahren notwendig. Zuerst muss der Untersuchungsrahmen zur Erstellung der Ökobilanz klar definiert werden. Danach müssen für die Erstellung einer Sachbilanz jegliche Rohstoffe, Abfälle, Emissionen bis hin zu Wasser und Bodenverunreinigungen quantifiziert werden sowie eine Wirkungsabschätzung erfolgen. Letzteres berücksichtigt z. B. den Treibhausgaseffekt, den Abbau des stratosphärischen Ozons, die Beanspruchung fossiler Ressourcen, die direkte Gesundheitsschädigung oder auch die direkte Schädigung von Ökosystemen. Zuletzt muss eine Auswertung durch die Zusammenführung der Ergebnisse vorherigen Schritte erfolgen.

Darüber hinaus ist es für die Stadt München relevant zu analysieren, wie die ambitionierten Klimaziele – insbesondere die Klimaneutralität in 2035 – tatsächlich erreicht werden können. Mit Blick auf sektorale Ziele im Bereich Mobilität und Transport erfolgt dies typischerweise durch die Erstellung eines Klimaschutzszenarios für die Verkehrsentwicklung. Einfluss findet dabei die Entwicklung von Fahrzeugflotten und Antriebstechnologien, eine Verkehrsnachfragemodellierung, sowie die Modellierung und Auswertung von THG-Emissionen. Durch die Definition und Analyse geeigneter Szenarien können somit spezifische Maßnahmen identifiziert und Transformationspfade erarbeitet werden, die in die mittel- und langfristige Planung der Stadt München einfließen sowie eine Grundlage für ein kontinuierliches Monitoring der Zielerreichung bilden. Ein Ziel sollte es sein die Personenkilometer im Straßenverkehr zu reduzieren. Dies schließt eine Reduzierung der Distanzen genauso mit ein wie den Wegfall unnötiger Fahrten. Nicht gefahrene Weg verbessern die Klimabilanz schließlich am effektivsten. Mittlerweile wurden im Rahmen des Fachgutachtens Klimaneutralität München 2035 sowohl für den Verkehr als auch für andere Endverbrauchssektoren derartige Klimaschutzszenarien vorgelegt.

Bereits in dieser Studie wurde als ein Kernergebnis der Hochlauf von batteriegestützter Elektromobilität identifiziert. Durch die stark steigende Nachfrage an Strom zur Abdeckung der Verkehrs- und Transportleistungen muss eine adäquate Energieversorgung in Zukunft sichergestellt werden. Dafür gilt es insbesondere zu analysieren, welche Energieträger in welchem Ausmaß zur Verfügung stehen werden, z. B. auch unter Betrachtung der steigenden Relevanz von Wasserstoff und potentiell auch E-Fuels. Hier spielt für die Stadt München ihre geografische Lage und ihre Einwohnerzahl eine große Rolle. Insbesondere erneuerbare Energien werden in Deutschland voraussichtlich im Norden produziert werden und müssen zuerst in den Süden transportiert werden. Zusätzlich muss die hohe Energienachfrage in der Metropolregion berücksichtigt werden. Entsprechend sind Transformationspfade zum einen insbesondere abhängig von der steigenden Nachfrage nach Strom oder strombasierten Kraftstoffen, zum anderen aber auch von der verfügbaren und geplanten Infrastruktur im Strom- und Gasnetz sowie der Errichtung von PV-Anlagen, Windrädern (in Bayern z. B. unter Beachtung der 10-H-Regel) sowie Elektrolyseuren zur Erzeugung von Wasserstoff oder Anlagen zur Produktion von E-Fuels.

Zudem müssen auch die politischen Richtlinien sowie die Auslegung neuer Förderprogramme berücksichtig werden. So ist es notwendig zusätzlich zu der konzeptionellen Erarbeitung von Ökobilanz und Klimaschutzstrategie den Aufbau neuer Infrastruktur für alternative Technologien voranzutreiben. Neben einer Stärkung der bisherigen Maßnahmen im Bereich Elektromobilität und Ladeinfrastruktur betrifft dies z. B. die HyLand-Wasserstoffprojekte, in denen der H2-Tankstellenaufbau eine große Rolle spielen muss, oder aber auch eine mögliche perspektivische Potentialanalyse von E-Fuel-Förderung in der Region.

Während die oben genannten Aspekte eine starke Kopplung zwischen Mobilität und zugrundeliegendem Energiesystem aufweisen, werden zudem weitere Maßnahmen einen ergänzenden Einfluss auf die nachhaltige Ausgestaltung von Mobilität und Transport im urbanen Kontext haben. Dies sind z. B. Potentialanalysen für den strategischen Ausbau des ÖPNV sowie dessen Stärkung durch die Optimierung des multimodalen Angebots (Mikromobilität, On-Demand-Verkehre, Seilbahnen etc.), die intelligente Bepreisung von Infrastruktur, z. B. im Kontext von Parken, oder auch die Optimierung von Verkehrsflüssen durch vernetzte Fahrzeuge und Infrastruktur.

Viele der zuletzt genannten Aspekte werden bereits im Mobilitätsplan der Stadt München angerissen und in ersten Projekten erarbeitet. Aufbauend auf dieser Studie kann – neben der Erarbeitung der existierenden Mobilitätsplanpunkte – eine Strategie zu alternativen Kraftstoffen ergänzt werde.

10 Verwendete Abkürzungen

10.1 Antriebstechnologien

BEV	„Battery Electric Vehicle" (batterielektrisches Fahrzeug)
BEV-OC	„Opportunity-Charger" (batterieelektrischer Gelegenheitslader)
BEV-ON	„Overnight-Charger" (batterieelektrischer Nachtlader)
FCEV	„Fuel Cell Electric Vehicle" (Brennstoffzellenfahrzeug)
FCEV-REX	Brennstoffzellenfahrzeug mit „Range-Extender", welcher mithilfe einer größeren Batterie erfolgt
ICEV	„Internal Combution Engine Vehicle" (Fahrzeug mit Verbrennungsmotor)
PHEV	Plug-In Hybrid
HEV	„Hybrid-Electric-Vehicle" (Hybrid)

10.2 Kraftstoffe

PtG	„Power-to-Gas" beschreibt die Herstellung von strombasierten gasförmigen Kraftstoffen
PtL	„Power-to-Liquid" beschreibt die Herstellung von strombasierten flüssigen Kraftstoffen
CNG	„Compressed Natural Gas" (komprimiertes Erdgas)
LNG	„Liquified Natural Gas" (verflüssigtes Erdgas)
LPG	„Liquid Petroleum Gas" (Autogas)
E-CNG	Strombasiertes CNG, ein PtG
E-LNG	Strombasiertes LNG, ein PtG
E-Diesel	Strombasierter Diesel

10.3 Moleküle

CH_4	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CO_2e	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
CO_2e/fzkm	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente pro Fahrzeugkilometer
CO_2e/MJ	Kohlenstoffdioxid-Äquivlante pro Megajoule (Energieeinheit)
FAME	"fatty acid methyl ester" (Fettsäuremethylester)
H_2	Wasserstoff
NH_3	Ammoniak
NMHC	„Non-Methane-Hydrocarbons" (Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe)
NMVOC	„Non-Methane Volatile Organic Compound" (Nicht-Methan-flüchtige organische Verbindungen)
NO_x	Stickstoffoxide
O_2	Sauerstoff
PM	Feinstaubpartikelmasse

10.4 Sonstiges

EEV	Enhanced Environmentally Friendly Vehicle
LNF	Leichtes Nutzfahrzeug
TEN-V	Transeuropäisches Verkehrsnetz
THG	Treibhausgase
WTT	Well-to-Tank
TTW	Tank-to-Wheel
WTW	Well-to-Wheel
WLTP	„Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure" (Weltweit einheitliches Leichtfahrzeuge-Test-verfahren)

11 Quellenangaben

[1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Die Nationale Wasserstoffstrategie," Berlin, 2020.

[2] M. Andersen, „VIENNA TOPS MERCER'S 21ST QUALITY OF LIVING RANKING," 13 März 2019. [Online]. Available: https://www.mercer.com/newsroom/2019-quality-of-living-survey.html. [Zugriff am 4 Oktober 2021].

[3] Pendleratlas, „Pendleratlas München," 2021. [Online]. Available: https://www.pendleratlas.de/bayern/muenchen/. [Zugriff am 4 Oktober 2021].

[4] Umweltbundesamt, „Treibhausgas-Emissionen in Deutschland," 6 Juni 2021. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland. [Zugriff am 4 Oktober 2021].

[5] Kraftfahrt-Bundesamt, „Bestand," 1 Januar 2021. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html. [Zugriff am 4 Oktober 2021].

[6] Kraftfahrtbundesamt, „Inländerfahrleistung 2020," 2020. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/vk_inlaenderfahrleistung_node.html;jsessionid=B60DD24E63E77621CEE6D5CD38134D14.live21321. [Zugriff am 2 11 2021].

[7] Umweltbundesamt, „Die Treibhausgase," 7 Mai 2021. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase. [Zugriff am 4 Oktober 2021].

[8] INFRAS, „Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA)," 2021.

[9] Agora Verkehrswende, „Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen," 2019.

[10] Kraftfahrtbundesamt, „Personenkraftwagen am 1. Januar 2021 nach ausgewählten Kraftstoffarten," 2021. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Jahrebilanz_Bestand/2021/2021_b_jahresbilanz_tabellen.html. [Zugriff am 14 10 2021].

[11] ADAC e.V., „So haben sich die Spritpreise seit 1950 entwickelt," 1 Oktober 2021. [Online]. Available: https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/deutschland/kraftstoffpreisentwicklung/. [Zugriff am 4 Oktober 2021].

[12] Statistisches Bundesamt, „Presse - Deutscher Rohöl-Import 2018 auf Tiefstand seit 1992," 2019. [Online]. [Zugriff am 30 September 2021].

[13] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, „Energiedaten.Bayern – kompakt – Februar 2020," 2020.

[14] ICCT, „A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars," 2021.

[15] Öko-Institut e.V., „eFuels im Verkehrssektor," 2020.

[16] VTT, „Fuel and Technology Alternatives for Buses," 2012.

[17] Deutsche Industrie- und Handelskammern, „Wasserstoff DIHK-Faktenpapier," 2020.

[18] Enerdata, „Erdgasförderung," [Online]. Available: https://energiestatistik.enerdata.net/erdgas/welt-erdgas-produktion-statistik.html. [Zugriff am 4 Oktober 2021].

[19] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Erdgasversorgung in Deutschland," [Online]. Available: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/gas-erdgasversorgung-in-deutschland.html. [Zugriff am 4 Oktober 2021].

[20] M. I. Khan, T. Yasmin und A. Shakoor, „Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel," *Renewable and Sustainable Energy Reviews 51,* 2015.

[21] J. Sihvonen , „CNG and LNG for vehicles and ships - the facts," Transport & Environment, 2018.

[22] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., „Erdgas," [Online]. Available: https://www.bdew.de/energie/erdgas/. [Zugriff am 4 Oktober 2021].

[23] Zukunft Gas e.V., „Erdgas," [Online]. Available: https://gas.info/. [Zugriff am 4 Oktober 2021].

[24] Zukunft Gas GmbH, „Vom günstigen Erdgas-Preis auch im Auto profitieren," [Online]. Available: https://www.erdgas.info/erdgas-mobil/erdgas-fahren-rechnet-sich#:~:text=Durchschnittliche%20Tankstellenpreise%20(Stand%3A%20Jahresdurchschnitt%202020,10%20Euro%20(H%2DGas). [Zugriff am 4 Oktober 2021].

[25] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Der LNG-Markt und LNG-Infrastruktur in Deutschland," [Online]. Available: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Schlaglichter-der-Wirtschaftspolitik/2019/05/kapitel-1-7-lng.html. [Zugriff am 4 Oktober 2021].

[26] Fraunhofer ISE, „Nettostromerzeugung in Deutschland 2020: erneuerbare Energien erstmals über 50 Prozent," 4 Januar 2021. [Online]. Available: https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2020/nettostromerzeugung-in-deutschland-2021-erneuerbare-energien-erstmals-ueber-50-prozent.html. [Zugriff am 11 Oktober 2021].

[27] Fraunhofer ISI, „Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw," 2019.

[28] VDI/VDE, „Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge," 2019.

[29] American Automobile Association, „Electric Vehicle Range Testing," 2019.

[30] Fraunhofer ISI, „Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf," 2020.

[31] DLR, „Potenziale des Hybrid-Oberleitungsbusses als effiziente Möglichkeit für die Nutzung erneuerbarer Energien im ÖPNV," 2015.

[32] NOW GmbH, „Projektübersicht 2019/2020 Zero Emission Busse in Deutschland," 2020.

[33] Hessen Mobil, [Online]. Available: https://ehighway.hessen.de/ELISA. [Zugriff am 07 10 2021].

[34] nordbayern, „https://www.nordbayern.de/region/a9-soll-zur-elektro-autobahn-fur-laster-werden-kommt-e-highway-nach-franken-1.11343529," [Online]. Available: https://www.nordbayern.de/region/a9-soll-zur-elektro-autobahn-fur-laster-werden-kommt-e-highway-nach-franken-1.11343529. [Zugriff am 07 10 2021].

[35] Kraftfahrtbundesamt, „Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern," Kraftfahrtbundesamt, 2021.

[36] Landeshauptstadt München, „Daten zu Flotten der Stadt München," 2021.

[37] Europäische Kommission, „Der europäische Grüne Deal," Brüssel, 2019.

[38] Bundesanzeiger, „Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie (EU) 2019/1161 vom 20. Juni 2019 zur Änderung der Richtlinie 2009/33/EG über die Förderung sauberer und energieeffizienter Straßenfahrzeuge sowie zur Änderung vergaberechtlicher Vorschriften," Bonn, 2021.

[39] D. M. Haberland, „Neue Studie zur Verkehrsleistung der Verkehrsträger in München: 58% Auto, 39% ÖPNV und 3% Fahrrad," Mobil in Deutschland e.V., [Online]. Available: https://www.mobil.org/studie-verkehrsleistung-verkehrstraeger-muenchen-auto-oepnv-fahrrad/. [Zugriff am 25 5 2022].

[40] infas, DLR, IVT und infas 360, „Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht," Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur , 2018.

[41] Kraftfahrtbundesamt, „Durchschnittsalter der Personenkraftwagen wächst," 2021.

[42] Energie Codes und Services GmbH, „E–Tankstellen in Ihrer Nähe - das Ladesäulenverzeichnis des BDEW," [Online]. Available: https://ladesaeulenregister.de/. [Zugriff am 18 10 2021].

[43] ADAC, „Tesla Model 3 im Test: Beeindruckend – trotz einiger Schwächen," 5 Februar 2021. [Online]. Available: https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/tesla/tesla-model-3/. [Zugriff am 3 November 2021].

[44] NOW GmbH, „HyLand," [Online]. Available: https://www.hy.land/. [Zugriff am 15 Oktober 2021].

[45] G. Mühlthaler, „Erdgas-Fahrzeuge: Frust bei der Münchner Müllabfuhr," Abendzeitung Digital GmbH & Co KG, 4 Oktober 2021. [Online]. Available: https://www.abendzeitung-muenchen.de/muenchen/erdgas-fahrzeuge-frust-bei-der-muenchner-muellabfuhr-art-760923.

[46] G. Dr. Dietrich und B. Frederik, „Zukunft LNG - Flüssiges Erdgas als sauberer Kraftstoff für schwere Lkw und Flottenfahrzeuge," DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., 2015.

[47] C. Butnaru und P. D.-I. T. Heinze, „Well-to-Wheel-Analysen von Gasfahrzeugen," Deutscher Verband Flüssiggas e. V., 2012.

[48] Umweltbundesamt, „Kraftstoffverbrauch im Personen- und Güterstraßenverkehr," 2021.

[49] ADAC, „Kostenvergleich e-Fahrzeuge + Plug-In Hybride gegen Benziner und Diesel," 2021.

[50] bft, „Entwicklung der Tankstellenanzahl in Deutschland," [Online]. Available: bft.de/daten-und-fakten/entwicklung-tankstellenanzahl. [Zugriff am 9 November 2021].

[51] H2 MOBILITY Deutschland GmbH & Co. KG, „H2 Live," [Online]. Available: https://h2.live/tankstellen/. [Zugriff am 9 November 2021].

[52] Kraftfahrtbundesamt, „KBA Fahrzeugbestand nach Zulassungsbezirk," 2021. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/ZulassungsbezirkeGemeinden/zulassungsbezirke_node.html. [Zugriff am 14 10 2021].

[53] dena, „LNG-Taskforce und Initiative Erdgasmobilität," [Online]. Available: https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/mobilitaet/lng-taskforce-und-initiative-erdgasmobilitaet/. [Zugriff am 9 November 2021].

[54] PRIMAGAS, „LNG-Tankstelle: Standorte im Überblick und betriebseigene Lösungen," [Online]. Available: https://fluessiggas.de/wissen/gewerbe/lng-tankstelle/. [Zugriff am 27 07 2021].

[55] Wirtschaftsverband Fuels und Energie, „Statistiken," [Online]. Available: archiv.en2x.de. [Zugriff am 11 November 2021].

[56] Bundesnetzagentur, „Umstellung von L- auf H-Gas," [Online]. Available: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Vportal/Energie/UmstellungGas/start.html. [Zugriff am 4 Oktober 2021].

[57] Deutscher Industrie- und Handelskammertag e. V. (DIHK), „Wasserstoff – DIHK Faktenpapier," Berlin, 2020.

[58] Kraftfahrtbundesamt, „Bestand nach Fahrzeugalter," 1 Januar 2021. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Fahrzeugalter/2021/2021_b_alter_kfz_zeitreihen.html;jsessionid=AE8CAB38E9090A94156A65FE6242FC62.live11292?nn=3524968&fromStatistic=3524968&yearFilter=2021&fromStatistic=3524968&yearFilter=2021. [Zugriff am 4 Oktober 2021].

[59] Kraftfahrtbundesamt, „Bestandsdaten 01.01.2021," 2021. [Online]. Available: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html. [Zugriff am 14 10 2021].

[60] Stadtwerke Solingen GmbH, „Das Projekt BOB: der Batterie-Oberleitungs-Bus im Smart-Trolleybus-System," 2018.

[61] „Ladesäulen in München, Deutschland," goingelectric.com, [Online]. Available: https://www.goingelectric.de/stromtankstellen/Deutschland/Muenchen/. [Zugriff am 16 November 2021].

[62] „Gesetz über die Beschaffung sauberer Straßenfahrzeuge," Bundesministerium für Digitales und Verkehr, 2022. [Online]. Available: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/clean-vehicles-directive.html.

12 Anhang

Im Folgenden sind die Bewertungen der verschiedenen Einsatzszenarien anhand der definierten sechs Kriterien dargelegt. Es wurden für die einzelnen Kriterien Unterkategorien definiert, anhand derer ein Scoring (von null bis drei) vorgenommen wurde. Null steht für eine schlechte Bewertung und „in diesem Kriterium ungeeignet". Der Score drei ist die beste Bewertung, die eine Technologie erhalten kann und steht für eine sehr gute Eignung in der jeweiligen Kategorie, siehe Kapitel 7.3. Die Zahlen in der nachfolgenden Tabelle mitteln die jeweiligen Scores der Unterkategorien.

1: Klimabilanz
2: Lokale Emissionen
3: Marktverfügbarkeit
4: Wirtschaftlichkeit
5: Regionale Energieträgerverfügbarkeit
6: (Inter-)nationale Regulatorik

Kurzfahrten Pkw (Kompakt)		1	2	3	4	5	6
ICEV	**Fossiles Benzin**	0,9	1,2	3,0	1,3	2,0	0,0
	Fossiler Diesel	1,0	1,0	3,0	1,3	2,0	0,0
	Biodiesel	1,8	1,0	3,0	1,5	1,7	0,0
	Synthetischer Diesel (DE Strommix)	0,4	1,0	1,7	1,2	1,7	0,0
	Synthetischer Diesel (grüner Strom)	3,0	1,0	1,7	1,2	1,7	0,0
	Fossiles CNG	1,1	1,2	3,0	2,2	1,7	0,3
	Bio-CNG	3,0	1,2	3,0	1,5	1,3	0,3
	Synthetisches CNG (grüner Strom)	3,0	1,2	2,3	1,2	1,3	0,3
	LPG	1,1	0,6	3,0	1,7	2,0	0,3
HEV	**Fossiles Benzin**	1,1	1,4	2,3	1,0	2,0	0,0
PHEV	**Fossiles Benzin, Deutscher Strommix**	1,1	1,1	2,3	1,5	1,7	0,3
	Fossiles Benzin, Grüner Strommix	1,3	1,1	2,3	1,5	1,3	0,3
BEV-ON	**Deutscher Strommix**	1,8	3,0	2,3	2,3	2,3	2,7
	Grüner Strommix	3,0	3,0	2,3	2,3	2,0	2,7
FCEV	**Wasserstoff - DE_Strom_Mix**	0,7	3,0	0,7	1,2	1,3	2,5
	Wasserstoff Grün	3,0	3,0	0,7	1,2	1,3	2,5
	Wasserstoff Türkis	2,2	3,0	0,3	0,5	0,3	2,5
	Wasserstoff Blau	1,8	3,0	1,0	1,2	1,3	2,5
	Wasserstoff Grau	1,2	3,0	1,0	1,2	1,3	2,5

Kurzfahrten Pkw (SUV)		1	2	3	4	5	6
ICEV	**Fossiles Benzin**	1,0	1,3	3,0	1,3	2,0	0,0
	Fossiler Diesel	1,0	1,0	3,0	1,3	2,0	0,0
	Biodiesel	1,8	1,0	3,0	1,5	1,7	0,0
	Synthetischer Diesel (DE Strommix)	0,4	1,0	1,7	1,2	1,7	0,0
	Synthetischer Diesel (grüner Strom)	3,0	1,0	1,7	1,2	1,7	0,0
	Fossiles CNG	1,3	1,6	3,0	2,2	1,7	0,3
	Bio-CNG	3,0	1,6	3,0	1,5	1,3	0,3
	Synthetisches CNG (grüner Strom)	3,0	1,6	2,3	1,2	1,3	0,3
HEV	**Fossiles Benzin**	1,1	1,4	1,7	1,0	2,0	0,0
PHEV	**Fossiles Benzin, Deutscher Strommix**	1,1	1,0	2,3	1,3	1,7	0,3
	Fossiles Benzin, Grüner Strommix	1,4	1,0	2,3	1,3	1,3	0,3
BEV-ON	**Deutscher Strommix**	1,6	3,0	2,3	2,3	2,3	2,7
	Grüner Strommix	3,0	3,0	2,3	2,3	2,0	2,7
FCEV	**Wasserstoff - DE_Strom_Mix**	0,8	3,0	1,3	1,2	1,3	2,5

	Wasserstoff Grün	3,0	3,0	1,3	1,2	1,3	2,5
	Wasserstoff Türkis	2,6	3,0	1,0	0,5	0,3	2,5
	Wasserstoff Blau	2,1	3,0	1,7	1,2	1,3	2,5
	Wasserstoff Grau	1,4	3,0	1,7	1,2	1,3	2,5

Langfahrten Pkw (Kompakt)		1	2	3	4	5	6
ICEV	**Fossiles Benzin**	0,9	1,2	3,0	1,3	2,0	0,0
	Fossiler Diesel	1,0	1,0	3,0	1,3	2,0	0,0
	Biodiesel	1,8	1,0	3,0	1,5	1,7	0,0
	Synthetischer Diesel (DE Strommix)	0,4	1,0	1,7	1,2	1,7	0,0
	Synthetischer Diesel (grüner Strom)	3,0	1,0	1,7	1,2	1,7	0,0
	Fossiles CNG	1,1	1,2	3,0	2,2	1,7	0,3
	Bio-CNG	3,0	1,2	3,0	1,5	1,3	0,3
	Synthetisches CNG (grüner Strom)	3,0	1,2	2,3	1,2	1,3	0,3
	LPG	1,1	0,6	3,0	1,7	2,0	0,3
HEV	**Fossiles Benzin**	1,1	1,4	2,3	1,0	2,0	0,0
PHEV	**Fossiles Benzin, Deutscher Strommix**	1,1	1,1	2,3	1,3	1,7	0,3
	Fossiles Benzin, Grüner Strommix	1,3	1,1	2,3	1,3	1,3	0,3
BEV-ON	**Deutscher Strommix**	1,8	3,0	2,3	2,3	2,3	2,7
	Grüner Strommix	3,0	3,0	2,3	2,3	2,0	2,7
FCEV	**Wasserstoff - DE_Strom_Mix**	0,7	3,0	0,7	1,2	1,3	2,5
	Wasserstoff Grün	3,0	3,0	0,7	1,2	1,3	2,5
	Wasserstoff Türkis	2,2	3,0	0,3	0,5	0,3	2,5
	Wasserstoff Blau	1,8	3,0	1,0	1,2	1,3	2,5
	Wasserstoff Grau	1,2	3,0	1,0	1,2	1,3	2,5

Langfahrten Pkw (SUV)		1	2	3	4	5	6
ICEV	**Fossiles Benzin**	1,0	1,3	3,0	1,3	2,0	0,0
	Fossiler Diesel	1,0	1,0	3,0	1,3	2,0	0,0
	Biodiesel	1,8	1,0	3,0	1,5	1,7	0,0
	Synthetischer Diesel (DE Strommix)	0,4	1,0	1,7	1,2	1,7	0,0
	Synthetischer Diesel (grüner Strom)	3,0	1,0	1,7	1,2	1,7	0,0
	Fossiles CNG	1,3	1,6	3,0	2,2	1,7	0,3
	Bio-CNG	3,0	1,6	3,0	1,5	1,3	0,3
	Synthetisches CNG (grüner Strom)	3,0	1,6	2,3	1,2	1,3	0,3
HEV	**Fossiles Benzin**	1,1	1,4	1,7	1,0	2,0	0,0
PHEV	**Fossiles Benzin, Deutscher Strommix**	1,1	1,0	2,3	1,3	1,7	0,3
	Fossiles Benzin, Grüner Strommix	1,4	1,0	2,3	1,3	1,3	0,3
BEV-ON	**Deutscher Strommix**	1,6	3,0	2,3	2,3	2,3	2,7
	Grüner Strommix	3,0	3,0	2,3	2,3	2,0	2,7
FCEV	**Wasserstoff - DE_Strom_Mix**	0,8	3,0	1,3	1,2	1,3	2,5
	Wasserstoff Grün	3,0	3,0	1,3	1,2	1,3	2,5
	Wasserstoff Türkis	2,6	3,0	1,0	0,5	0,3	2,5
	Wasserstoff Blau	2,1	3,0	1,7	1,2	1,3	2,5
	Wasserstoff Grau	1,4	3,0	1,7	1,2	1,3	2,5

Kleiner Umlauf Gelenkbus	1	2	3	4	5	6

ICEV	**Fossiler Diesel**	1,0	1,0	3,0	1,3	2,0	0,0
	Biodiesel	1,9	1,0	3,0	1,5	1,7	0,7
	Synthetischer Diesel (DE Strommix)	0,4	1,0	1,7	1,2	1,7	0,7
	Synthetischer Diesel (grüner Strom)	3,0	1,0	1,7	1,2	1,7	0,7
	Fossiles CNG	1,0	1,9	2,3	2,2	1,7	1,0
	Bio-CNG	3,0	1,9	2,3	2,0	1,3	1,0
	Synthetisches CNG (grüner Strom)	3,0	1,9	2,0	1,2	1,3	1,0
PHEV	**Fossiler Diesel, Deutscher Strommix**			3,0	1,0	1,7	0,0
	Fossiler Diesel, Grüner Strommix			3,0	1,0	1,3	0,0
BEV-ON	**Deutscher Strommix**	1,5	3,0	2,3	2,0	2,3	2,5
	Grüner Strommix	3,0	3,0	2,3	2,0	2,0	2,5
BEV-OC	**Deutscher Strommix**	1,5	3,0	2,3	2,0	2,3	2,5
	Grüner Strommix	3,0	3,0	2,3	2,0	2,0	2,5
HO	**Deutscher Strommix**	1,5	3,0	2,3	2,0	2,3	2,5
	Grüner Strommix	3,0	3,0	2,3	2,0	2,0	2,5
FCEV	**Wasserstoff - DE_Strom_Mix**	0,6	3,0	2,0	0,8	1,3	2,3
	Wasserstoff Grün	3,0	3,0	2,0	0,8	1,3	2,3
	Wasserstoff Türkis	2,8	3,0	1,3	0,0	0,3	2,3
	Wasserstoff Blau	2,0	3,0	2,3	0,8	1,3	2,3
	Wasserstoff Grau	1,1	3,0	2,3	0,8	1,3	2,3
FCEV-REX	**Wasserstoff - DE_Strom_Mix**	0,6	3,0	2,0	0,8	1,3	2,3
	Wasserstoff Grün	3,0	3,0	2,0	0,8	1,3	2,3
	Wasserstoff Türkis	2,8	3,0	1,3	0,0	0,3	2,3
	Wasserstoff Blau	2,0	3,0	2,3	0,8	1,3	2,3
	Wasserstoff Grau	1,1	3,0	2,3	0,8	1,3	2,3

Großer Umlauf Solobus		1	2	3	4	5	6
ICEV	**Fossiler Diesel**	1,0	1,0	3,0	1,3	2,0	0,0
	Biodiesel	1,9	1,0	3,0	1,5	1,7	0,7
	Synthetischer Diesel (DE Strommix)	0,3	1,0	1,7	1,2	1,7	0,7
	Synthetischer Diesel (grüner Strom)	3,0	1,0	1,7	1,2	1,7	0,7
	Fossiles CNG	0,9	1,9	2,3	2,2	1,7	1,0
	Bio-CNG	3,0	1,9	2,3	2,0	1,3	1,0
	Synthetisches CNG (grüner Strom)	3,0	1,9	2,0	1,7	1,3	1,0
PHEV	**Fossiler Diesel, Deutscher Strommix**			3,0	1,0	1,7	0,0
	Fossiler Diesel, Grüner Strommix			3,0	1,0	1,3	0,0
BEV-ON	**Deutscher Strommix**	1,6	3,0	1,0	2,0	2,3	2,5
	Grüner Strommix	3,0	3,0	1,0	2,0	2,0	2,5
BEV-OC	**Deutscher Strommix**	1,6	3,0	1,0	2,0	2,3	2,5
	Grüner Strommix	3,0	3,0	1,0	2,0	2,0	2,5
HO	**Deutscher Strommix**	1,6	3,0	1,0	2,0	2,3	2,5
	Grüner Strommix	3,0	3,0	1,0	2,0	2,0	2,5
FCEV	**Wasserstoff - DE_Strom_Mix**	0,6	3,0	2,0	0,8	1,3	2,3
	Wasserstoff Grün	3,0	3,0	2,0	0,8	1,3	2,3
	Wasserstoff Türkis	2,8	3,0	1,3	0,0	0,3	2,3
	Wasserstoff Blau	2,0	3,0	2,3	0,8	1,3	2,3
	Wasserstoff Grau	1,1	3,0	2,3	0,8	1,3	2,3

FCEV-REX	**Wasserstoff - DE_Strom_Mix**	0,6	3,0	2,0	0,8	1,3	2,3
	Wasserstoff Grün	3,0	3,0	2,0	0,8	1,3	2,3
	Wasserstoff Türkis	2,8	3,0	1,3	0,0	0,3	2,3
	Wasserstoff Blau	2,0	3,0	2,3	0,8	1,3	2,3
	Wasserstoff Grau	1,1	3,0	2,3	0,8	1,3	2,3

Lkw N1		1	2	3	4	5	6
ICEV	**Fossiles Benzin**	1,1	1,6	3,0	1,0	2,0	0,0
	Fossiler Diesel	1,0	1,0	3,0	1,0	2,0	0,0
	Biodiesel	1,8	1,0	3,0	1,2	1,7	0,0
	Synthetischer Diesel (DE Strommix)	0,4	1,0	1,7	0,8	1,7	0,0
	Synthetischer Diesel (grüner Strom)	3,0	1,0	1,7	0,8	1,7	0,0
	Fossiles CNG	1,0	1,3	3,0	1,8	1,7	0,3
	Bio-CNG	3,0	1,3	3,0	1,2	1,3	0,3
	Synthetisches CNG (grüner Strom)	2,9	1,3	2,3	0,8	1,3	0,3
PHEV	**Fossiles Benzin, Deutscher Strommix**	1,0	1,0	1,0	1,3	1,7	0,7
	Fossiles Benzin, Grüner Strommix	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	0,7
BEV_ON	**Deutscher Strommix**	1,6	3,0	2,3	2,3	2,3	2,5
	Grüner Strommix	3,0	3,0	2,3	2,3	2,0	2,5
FCEV	**Wasserstoff - DE_Strom_Mix**	0,6	3,0	1,3	0,8	1,3	2,4
	Wasserstoff Grün	3,0	3,0	1,3	0,8	1,3	2,4
	Wasserstoff Türkis	2,3	3,0	1,0	0,0	0,3	2,4
	Wasserstoff Blau	1,8	3,0	1,7	0,8	1,3	2,4
	Wasserstoff Grau	1,1	3,0	1,7	0,8	1,3	2,4

Lkw N2		1	2	3	4	5	6
ICEV	**Fossiler Diesel**	1,0	1,0	3,0	1,3	2,0	0,0
	Biodiesel	1,8	1,0	3,0	1,5	1,7	0,7
	Synthetischer Diesel (DE Strommix)	0,4	1,0	1,7	1,2	1,7	0,7
	Synthetischer Diesel (grüner Strom)	3,0	1,0	1,7	1,2	1,7	0,7
	Fossiles CNG	1,0	2,0	3,0	2,2	1,7	1,0
	Bio-CNG	3,0	2,0	3,0	1,5	1,3	1,0
	Synthetisches CNG (grüner Strom)	3,0	2,0	2,3	1,2	1,3	1,0
	Fossiles LNG	1,1	2,0	3,0	1,8	0,7	1,3
	Bio-LNG	3,0	2,0	3,0	1,5	1,3	1,3
	Synthetisches LNG (grüner Strom)	2,8	2,0	2,3	1,2	1,3	1,3
HO (ICEV)	**Fossiler Diesel, Deutscher Strommix**	2,0	2,0	1,0	1,0	1,7	0,0
	Fossiler Diesel, Grüner Strommix	2,0	2,0	1,0	1,0	1,3	0,0
PHEV	**Fossiler Diesel, Deutscher Strommix**	2,0	2,0	1,0	1,0	1,7	0,0
	Fossiler Diesel, Grüner Strommix	2,0	2,0	1,0	1,0	1,3	0,0
BEV_ON	**Deutscher Strommix**	1,6	3,0	2,0	2,0	2,3	2,5
	Grüner Strommix	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0	2,5
HO (BEV)	**Deutscher Strommix**	1,6	3,0	2,0	2,0	2,3	2,5
	Grüner Strommix	3,0	3,0	2,0	2,0	2,0	2,5
FCEV	**Wasserstoff - DE_Strom_Mix**	0,6	3,0	0,7	1,2	1,3	2,3
	Wasserstoff Grün	3,0	3,0	0,7	1,2	1,3	2,3

	Wasserstoff Türkis	2,5	3,0	0,3	0,5	0,3	2,3
	Wasserstoff Blau	2,0	3,0	1,0	1,2	1,3	2,3
	Wasserstoff Grau	1,2	3,0	1,0	1,2	1,3	2,3

Lkw N3		1	2	3	4	5	6
ICEV	Fossiler Diesel	1,0	1,0	3,0	1,3	2,0	0,0
	Biodiesel	1,9	1,0	3,0	1,5	1,7	0,7
	Synthetischer Diesel (DE Strommix)	0,3	1,0	1,7	1,2	1,7	0,7
	Synthetischer Diesel (grüner Strom)	3,0	1,0	1,7	1,2	1,7	0,7
	Fossiles LNG	1,1	2,0	3,0	1,8	0,7	1,3
	Bio-LNG	3,0	2,0	3,0	1,5	1,3	1,3
	Synthetisches LNG (grüner Strom)	2,9	2,0	2,3	1,2	1,3	1,3
HO (ICEV)	Fossiler Diesel, Deutscher Strommix	2,0	2,0	1,0	1,0	1,7	0,0
	Fossiler Diesel, Grüner Strommix	2,0	2,0	1,0	1,0	1,3	0,0
PHEV	Fossiler Diesel, Deutscher Strommix	2,0	2,0	1,0	1,0	1,7	0,0
	Fossiler Diesel, Grüner Strommix	2,0	2,0	1,0	1,0	1,3	0,0
BEV_ON	Deutscher Strommix	1,4	3,0	1,0	2,0	2,3	2,5
	Grüner Strommix	3,0	3,0	1,0	2,0	2,0	2,5
HO (BEV)	Deutscher Strommix	1,4	3,0	1,0	2,0	2,3	2,5
	Grüner Strommix	3,0	3,0	1,0	2,0	2,0	2,5
FCEV	Wasserstoff - DE_Strom_Mix	0,6	3,0	1,3	1,2	1,3	2,3
	Wasserstoff Grün	3,0	3,0	1,3	1,2	1,3	2,3
	Wasserstoff Türkis	2,3	3,0	1,0	0,5	0,3	2,3
	Wasserstoff Blau	1,8	3,0	1,7	1,2	1,3	2,3
	Wasserstoff Grau	1,1	3,0	1,7	1,2	1,3	2,3

Kehrmaschine		1	2	3	4	5	6
ICEV	Fossiler Diesel	1,0	1,0	3,0	1,3	2,0	0,0
	Biodiesel	1,8	1,0	3,0	1,5	1,7	0,0
	Synthetischer Diesel (DE Strommix)	0,4	1,0	1,7	1,2	1,7	0,0
	Synthetischer Diesel (grüner Strom)	3,0	1,0	1,7	1,2	1,7	0,0
	Fossiles CNG	1,1	2,0	1,7	2,2	1,7	0,3
	Bio-CNG	3,0	2,0	1,7	1,5	1,3	0,3
	Synthetisches CNG (grüner Strom)	3,0	2,0	1,3	1,2	1,3	0,3
PHEV	Fossiler Diesel, Deutscher Strommix	1,1	2,0	1,7	1,0	1,7	0,3
	Fossiler Diesel, Grüner Strommix	1,3	2,0	1,7	1,0	1,3	0,3
BEV-ON	Deutscher Strommix	1,8	3,0	2,3	2,0	2,3	2,5
	Grüner Strommix	3,0	3,0	2,3	2,0	2,0	2,5
FCEV	Wasserstoff - DE_Strom_Mix	0,7	3,0	1,3	0,5	1,3	2,3
	Wasserstoff Grün	3,0	3,0	1,3	0,5	1,3	2,3
	Wasserstoff Türkis	2,2	3,0	1,0	0,0	0,3	2,3
	Wasserstoff Blau	2,0	3,0	1,7	0,5	1,3	2,3
	Wasserstoff Grau	1,2	3,0	1,7	0,5	1,3	2,3

Abfallsammelfahrzeug		1	2	3	4	5	6
ICEV	Fossiler Diesel	1,0	1,0	3,0	1,3	2,0	0,3
	Biodiesel	1,8	1,0	3,0	1,5	1,7	0,5

	Synthetischer Diesel (DE Strommix)	0,4	1,0	1,7	1,2	1,7	0,5
	Synthetischer Diesel (grüner Strom)	3,0	1,0	1,7	1,2	1,7	0,5
	Fossiles CNG	1,0	2,0	3,0	2,2	1,7	0,7
	Bio-CNG	3,0	2,0	3,0	1,5	1,3	0,8
	Synthetisches CNG (grüner Strom)	3,0	2,0	2,3	1,2	1,3	0,8
BEV-ON	**Deutscher Strommix**	1,6	3,0	1,7	2,0	2,3	2,2
	Grüner Strommix	3,0	3,0	1,7	2,0	2,0	2,2
FCEV	**Wasserstoff - DE_Strom_Mix**	0,6	3,0	2,0	0,5	1,3	2,0
	Wasserstoff Grün	3,0	3,0	2,0	0,5	1,3	2,0
	Wasserstoff Türkis	2,5	3,0	1,3	0,0	0,3	2,0
	Wasserstoff Blau	2,2	3,0	2,3	0,5	1,3	2,0
	Wasserstoff Grau	1,2	3,0	2,3	0,5	1,3	2,0

Feuerlöschfahrzeug		1	2	3	4	5	6
ICEV	**Fossiler Diesel**	1,0	1,0	3,0	1,3	2,0	0,3
	Biodiesel	1,8	1,0	3,0	1,5	1,7	0,5
	Synthetischer Diesel (DE Strommix)	0,4	1,0	1,7	1,2	1,7	0,5
	Synthetischer Diesel (grüner Strom)	3,0	1,0	1,7	1,2	1,7	0,5
	Fossiles CNG	1,0	2,0	3,0	2,2	1,7	0,7
	Bio-CNG	3,0	2,0	3,0	1,5	1,3	0,8
	Synthetisches CNG (grüner Strom)	3,0	2,0	2,3	1,2	1,3	0,8
PHEV	**Fossiler Diesel, Deutscher Strommix**	1,3	3,0	1,7	1,0	1,7	0,3
	Fossiler Diesel, Grüner Strommix	1,6	3,0	1,7	1,0	1,3	0,3
FCEV	**Wasserstoff - DE_Strom_Mix**	0,6	3,0	1,3	0,5	1,3	2,0
	Wasserstoff Grün	3,0	3,0	1,3	0,5	1,3	2,0
	Wasserstoff Türkis	2,5	3,0	1,0	0,0	0,3	2,0
	Wasserstoff Blau	2,2	3,0	1,7	0,5	1,3	2,0
	Wasserstoff Grau	1,2	3,0	1,7	0,5	1,3	2,0

Abbildung 19 stellt die betrachteten Antriebstechnologien pro Fahrzeugklasse in dieser Studie dar.

Abbildung 19: Betrachtete Antriebstechnologien in jeder Fahrzeugklasse

	Pkw		Busse		Lkw			Sondernutzfahrzeuge		
	Komp.	SUV	Solo	Gelenk	N1	N2	N3	Feuer	Müll	Kehr
ICEV	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
HEV	✓	✓			✓	✓	✓			
PHEV	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
BEV-ON	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
BEV-OC			✓	✓						
HO			✓	✓		✓	✓			
FCEV	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
FCEV-REX			✓	✓						

ICEV: Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, **HEV**: Hybridfahrzeug, **PHEV**: Plug-in-Hybrid Fahrzeug, **BEV-ON**: batterieelektrischer Nachtlader, **BEV-OC**: batterieelektrischer Gelegenheitslader, **HO**: Hybrid-Oberleitungs-Fahrzeug, **FCEV**: Brennstoffzellenfahrzeug, **FCEV-REX**: batterieelektrisches Fahrzeug mit Brennstoffzelle zur Verlängerung der Reichweite

Abbildung 20 stellt die Ergebnisse des 1. Quartils der WTW-Klimabilanz aller Kraftstoffe dar. Diese Grafik nimmt Bezug auf Abbildung 7.

Abbildung 20: Klimabilanz aller Kraftstoffe (1. Quartil)

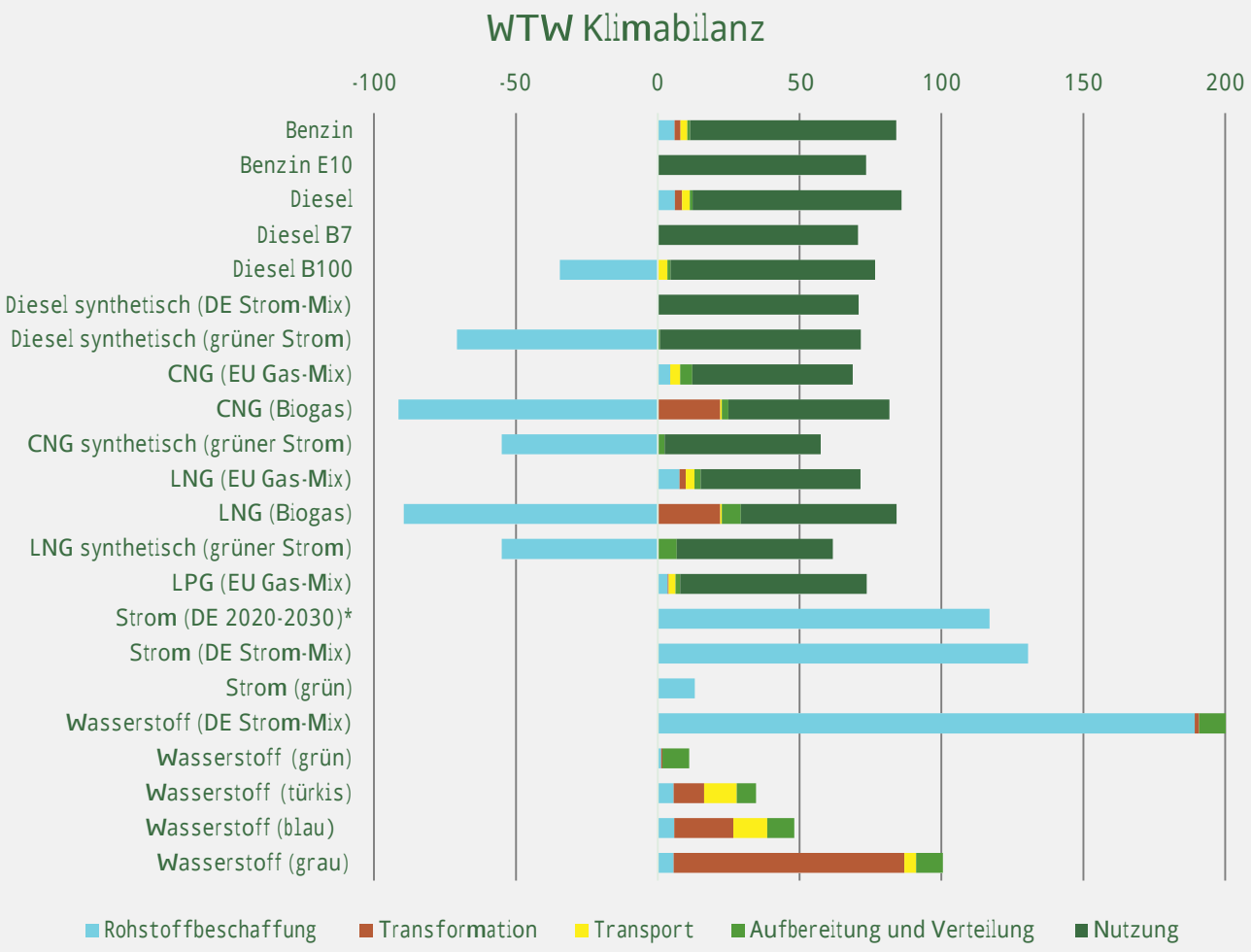


Abbildung 21 stellt die Ergebnisse des 3. Quartils der WTW-Klimabilanz aller Kraftstoffe dar. Diese Grafik nimmt Bezug auf Abbildung 7.

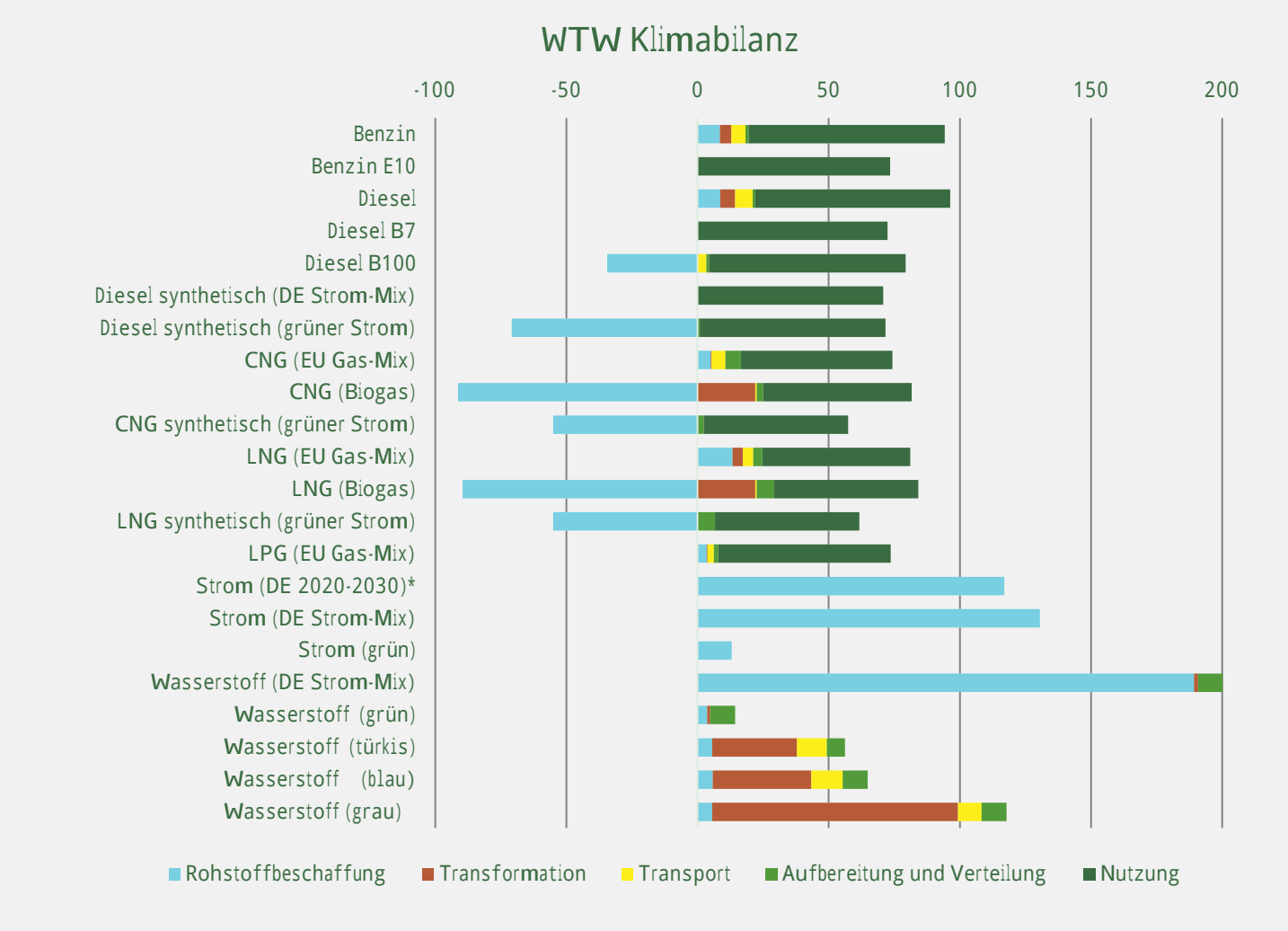



Abbildung 21: Klimabilanz aller Kraftstoffe (3. Quartil)