NPM
NATIONALE PLATTFORM
ZUKUNFT DER MOBILITÄT

WERKSTATTBERICHT ANTRIEBSWECHSEL NUTZFAHRZEUGE

WEGE ZUR DEKARBONISIERUNG SCHWERER LKW MIT FOKUS DER ELEKTRIFIZIERUNG

ARBEITSGRUPPE 1
KLIMASCHUTZ IM VERKEHR

NPM

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität

INHALT

EXECUTIVE SUMMARY 4

VORWORT: KLIMASCHUTZMASSNAHMEN IM SEKTOR VERKEHR UND DIE NOTWENDIGKEIT EINER SYSTEMISCHEN BETRACHTUNG 8

1 NUTZFAHRZEUGE UND DEREN RELEVANZ ZUR ERREICHUNG DER KLIMASCHUTZZIELE 10

2 WEGE ZUR ELEKTRIFIZIERUNG IM NUTZFAHRZEUGSEKTOR 13

2.1 Vergleich der Gutachten von Öko-Institut im Auftrag des BMU und von Prognos im Auftrag des BMWi 14
2.2 Darstellung verschiedener Technologieoptionen und notwendiger Schritte für eine Fokussierung zum Markthochlauf – ein möglicher Fahrplan zur Erreichung der Ziele des KSPr 2030 17
2.3 Betrachtung der THG-Vermeidungskosten 20
2.4 Betrachtung der Total Cost of Ownership (TCO) und wichtiger staatliche Instrumente zur Förderung elektrischer Antriebe bei schweren Nutzfahrzeugen 22

3 WEITERE ANSÄTZE ZUR DEKARBONISIERUNG DES SCHWEREN GÜTERVERKEHRS 30

4 ZUSAMMENFASSENDE GESAMTBETRACHTUNG UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN 34

ANHANG

Abschätzungen und Berechnungen zu benötigten Technologieoptionen zur Erreichung des Klimaschutzziels 2030 39
Berechnungsgrundlagen zur TCO-Betrachtung 43
Literaturverzeichnis 46
Abbildungsverzeichnis 48
Tabellenverzeichnis 48
Abkürzungsverzeichnis 49
Mitglieder Ad-hoc-Gruppe Antriebswechsel Nutzfahrzeuge 51
Gutachterinnen und Gutachter und externe Expertinnen und Experten 51
Redaktion 51

EXECUTIVE SUMMARY

Die Fahrleistung von Nutzfahrzeugen (Nfz) verursacht derzeit circa ein Drittel der Gesamtemissionen im Verkehrssektor. Daher besteht hier unmittelbarer Handlungsbedarf, um den notwendigen Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen (THG) im Sektor Verkehr von 42 % gegenüber 1990 zu leisten. Gemäß des Klimaschutzprogramms 2030 (KSPr 2030) soll dafür die Fahrleistung im schweren Güterverkehr zu einem Drittel elektrifiziert oder auf Basis strombasierter Kraftstoffe erbracht werden.

Der vorliegende Werkstattbericht analysiert – unter anderem auf Basis der von der Bundesregierung beauftragten aktuellen Gutachten des Öko-Instituts und Prognos – welchen Beitrag die Maßnahmen des KSPr 2030 leisten können, um im Nfz-Bereich eine nachhaltige CO_2-Reduktion zu erzielen. Dabei fokussiert dieser Werkstattbericht gemäß der oben genannten Maßgabe des KSPr 2030 auf die folgenden technologischen Pfade der Elektrifizierung für schwere Nfz (SNF):

- Batterieelektrische Antriebe (BEV-Lkw),
- Wasserstoff-Brennstoffzellentechnologie (H2-BZ-Lkw) und
- Oberleitungs-Hybride (OH-Lkw).

Das Kapitel 1 stellt die Relevanz des Antriebswechsels bei Nfz für das Erreichen der Klimaziele dar. **Bei einem Flottenanteil von 10 % sind schwere Nfz (>26 t zGG) für über die Hälfte der dort anfallenden Emissionen verantwortlich**. Aufgrund der **Heterogenität** von Fahrzeugtypen und Einsatzzwecken gibt es im Nfz-Bereich eine parallele Entwicklung mehrerer Technologiepfade zur CO2-Reduktion. Zudem schränken die **Wettbewerbsbedingungen** und **systemischen Abhängigkeiten** der Transport- und Logistikbranche den Handlungsspielraum der beteiligten Akteure ein.

Das Kapitel 2 beginnt mit einer eingehenden Analyse der beiden von der Bundesregierung in Auftrag gegebenen **Gutachten über die Gesamtminderungswirkung** des KSPr 2030. Es zeigt sich, dass – unter den zum Stand Januar 2020 gültigen Rahmenbedingungen und bereits umgesetzten Maßnahmen – im Jahr 2030 eine CO_2-Lücke im Verkehr bestehen bleibt.

Basierend auf dieser Analyse hat die AG 1 einen **möglichen Fahrplan zur Erreichung der Ziele des KSPr 2030** entwickelt, der die drei Technologiepfade (BEV-, H2-BZ- und OH-Lkw), deren Marktreife und infrastrukturelle Rahmenbedingungen darstellt. Die Berechnungen zu diesen Hochlaufkurven und zu den – im weiteren Kapitel 2 ausgeführten – volkswirtschaftlichen CO_2-Vermeidungskosten und Total Cost of Ownership (TCO) sowie die Betrachtung weiterer Entscheidungsparameter zeigen: **Zum jetzigen Zeitpunkt kann keine Fokussierung auf einen einzigen Technologiepfad empfohlen werden**. Jedoch kann eine **Technologiefokussierung mittelfristig sinnvoll sein**, um die technische Machbarkeit und eine Reduktion des gesamten Investitionsvolumens zu erwirken. Im Jahr 2023 sollte erneut eine Gesamtschau über die Entwicklungsstände der drei Technologien erfolgen.

Ebenso haben die Berechnungen gezeigt, dass durch den Einsatz **staatlicher Instrumente signifikante Möglichkeiten** zur Beeinflussung bestehen und auch genutzt werden sollten. Zu nennen sind hier: Zuschüsse auf Investitionsmehrkosten, Sonderabschreibungen sowie die Energiekosten beeinflussende Steuern und Umlagen. Als zentrales Instrument wird die Einführung einer CO_2-abhängigen Lkw-Maut gesehen, da sie das Kostenverhältnis der alternativen Antriebe zum Diesel-Lkw deutlich beeinflussen kann.

Zur weiteren Dekarbonisierung des Güterverkehrs hat die AG 1 in Kapitel 3 zusätzliche Maßnahmen beleuchtet, wie zum Beispiel die Nutzung gasförmiger Kraftstoffe im Verbrennungsmotor, die Optimierung von Trailern und Lkw-Ausstattungskomponenten sowie die Förderung von Verlagerungen und des kombinierten Verkehrs.

In **Kapitel 4 werden abschließend Handlungsempfehlungen an die Bundesregierung** aufgeführt. Es ist ein Höchstmaß an Geschwindigkeit und Konsequenz gefragt, um einen notwendigen Technologiemix für Mitte der 2020er-Jahre technisch, organisatorisch, sozialverträglich und wirtschaftlich marktfähig zu machen. Fahrzeugförderung, bedarfsgerechter Aufbau von Infrastrukturen und Kostendegression durch verstärkte Forschung und Entwicklung sind neben regulatorischen Instrumenten (CO_2-gespreizte Maut, Beeinflussung Energiekosten) wesentliche Hebel. Dabei ist von zentraler Bedeutung, Standardisierungs- und Normungsprozesse zu beschleunigen, um eine Skalierung der Technologieoptionen auch im europäischen Maßstab zu erreichen.

Die AG 1 wird das Handlungsfeld „Nutzfahrzeuge“ weiterbearbeiten und eine Einordnung in das Gesamtsystem vornehmen. Es ist geplant, die für die Erreichung der gesetzten Klimaziele notwendige integrierende Gesamtschau aller Handlungsfelder (Antriebswechsel Pkw, Antriebswechsel Nfz, Alternative Kraftstoffe, Schienenverkehr und Urbane Mobilität) im kommenden Jahr 2021 umzusetzen.

EXECUTIVE SUMMARY

The use of commercial vehicles currently causes approx. one third of all emissions from transport. That is why immediate action is required to make the necessary contribution to the 42 % reduction in greenhouse gas (GHG) emissions from the transport sector compared to 1990. According to the German Climate Change Programme 2030 (KSPr 2030), one third of heavy goods traffic is to be electrified or carried out on the basis of electricity-based fuels.

Building inter alia on the latest expert opinions commissioned by the German government and prepared by the German Oeko-Institut and Prognos, this workshop report analyses which contribution the actions of the KSPr 2030 can make in order to achieve sustainable GHG reduction in the area of commercial vehicles. In line with the above-mentioned KSPr 2030, this workshop report focuses on the following technological pathways of electrifying heavy goods vehicles (HGVs):

- Battery-electric drives (BEV-HGV),
- Hydrogen-fuel cell technology (H2-FC-HGV) and
- Overhead line-hybrids (OH-HGV).

Chapter 1 talks about the relevance of switching drives in commercial vehicles for achieving the climate goals. **With a fleet share of 10 %, HGVs (>26 t GVW) are responsible for more than half of the emissions from commercial transport**. As a result of the heterogeneity of vehicle types and purposes, several technology pathways towards a reduction in CO_2 emissions are being developed in parallel. Moreover, due to **competition** and **systemic dependencies**, stakeholders in the transport and logistics sector only have limited room for manoeuvre.

Chapter 2 starts off with an in-depth analysis of both **expert opinions on the total effect of reduction** of the KSPr 2030 commissioned by the Federal Government. It appears that – under the conditions effective in January 2020 and with the measures already implemented – a gap in CO_2 reduction in transport in 2030 will remain.

On the basis of this analysis, AG 1 has developed a **possible timetable to reach the goals of the KSPr 2030** which represents the three technological pathways (BEV-HGV, H2-FC-HGV and OH-HGV), their commercial viability and infrastructure requirements. The calculations for these run-up curves, the economic CO_2 abatement costs – which also form part of chapter 2 – and the total cost of ownership (TCO) as well as considerations regarding further parameters relevant for decision-making show one thing: **At this point in time, none of the technology pathways can be recommended as the sole focus.** However, in the **medium term, focussing on one technology can make sense** in order to arrive at technological feasibility and a reduction of the total investment volume. In 2023, an overall assessment to ascertain the development status of the three technologies should be carried out.

The calculations have also revealed that there are **significant opportunities to exercise influence through government instruments**. These opportunities which are to be used include: grants towards additional investment costs, special depreciation as well as taxes and levies which affect energy costs. The introduction of an emissions-related truck toll is considered to be a central instrument because it can have a huge impact on the cost ratio between alternative drives and Diesel HGVs.

In chapter 3, AG 1 is looking at further measures to decarbonise freight transport, such using gaseous fuels in combustion engines, optimising trailers and truck equipment as well as supporting a shift towards other modes of transport and combined transport.

In conclusion, chapter 4 gives recommendations for action to the German Government. Speed and consistency are of the essence in making the necessary technology mix marketable by mid-2020 in technological, organisational, social and economic terms. Apart from regulatory instruments (emissions-related toll, influencing energy costs),

vehicle support, needs-based development of infrastructure and economies of scale through increased research and development are all relevant factors. The acceleration of standardisation processes is of utmost importance in order to expand technology options for the European scale.

AG 1 will continue to work in the area of commercial vehicles and to place them into the bigger picture. An integrated overview of all areas of activity (alternative drives for cars, alternative drives for commercial vehicles, alternative fuels, rail transport and urban mobility) which is necessary to achieve the climate targets is planned for 2021.

VORWORT

KLIMASCHUTZMASSNAHMEN IM SEKTOR VERKEHR UND DIE NOTWENDIGKEIT EINER SYSTEMISCHEN BETRACHTUNG

Deutschland hat sich verpflichtet, bis 2030 die Treibhausgasemissionen (THG) im Sektor Verkehr um 42 % gegenüber 1990 zu senken. Aktuell ist auf Ebene der Europäischen Union (EU) eine Erhöhung der Minderungsziele in der Diskussion, die zu einer weiteren Verschärfung der Klimaschutzziele im Verkehr führen könnte. Mit dem Klimaschutzgesetz, das am 18.12.2019 in Kraft getreten ist, wurden sektorspezifische Jahresemissionsbudgets festgelegt, deren Einhaltung sichergestellt werden soll. Parallel zum Klimaschutzgesetz hat die Bundesregierung das Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr 2030) auf den Weg gebracht. Dank deutlicher Verbesserungen bei der Fahrzeugeffizienz konnte trotz der außerordentlich stark angestiegenen Verkehrsleistung gegenüber 1990 ein massiver Anstieg der Kohlenstoffdioxide (CO_2)-Emissionen im Verkehrssektor verhindert werden. Die ergriffenen Anstrengungen reichten aber zur Senkung der THG-Emissionen nicht aus, sodass zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen sind.

Im Klimaschutzprogramm 2030 finden sich für den Sektor Verkehr die von der Arbeitsgruppe 1 (AG 1) der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) im Zwischenbericht 3/2019 adressierten Handlungsfelder wieder. Eine zeitweise Einzelbetrachtung von Sektoren und Handlungsfeldern ist für die Operationalisierung von Klimaschutzmaßnahmen notwendig. Letztlich bedarf es aber eines systemischen Blicks, der die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Sektoren und Handlungsfeldern berücksichtigt. Mit einer sektorübergreifenden Perspektive können Konkurrenzsituationen zwischen einzelnen Sektoren um knappe Ressourcen wie beispielsweise Biomasse oder grünen Wasserstoff entschärft werden.

Erneuerbare Energien werden auf absehbare Zeit ein knappes Gut sein. Für die Erreichung der Klimaziele bedarf es deshalb neben einem ambitionierten Ausbau erneuerbarer Energien auch Energieimporte sowie einer massiven Steigerung der Energieeffizienz – und zwar in allen Sektoren.[1]

Für die Bewertung von (Einzel-)Maßnahmen und Unterzielen bedeutet dies letztlich, auch immer das gesamte Energiesystem im Blick zu behalten und dabei alle drei Kriterien des Nachhaltigkeitsdreiecks anzuwenden. Dabei gilt es, ethische Aspekte und Fragen der Resilienz zu berücksichtigen. Es geht darum, dem Gesamtziel des Klimaschutzes bestmöglich zuzuarbeiten und dabei entstehende Lasten so gering wie möglich zu halten, eine umweltverträgliche, bezahlbare und Lebensqualität bedeutende Mobilität zu ermöglichen sowie die Wettbewerbsfähigkeit des Wirtschaftsstandorts Deutschland zu verbessern und Beschäftigung zu erhalten.

1 BMWi (2019): S. 1.

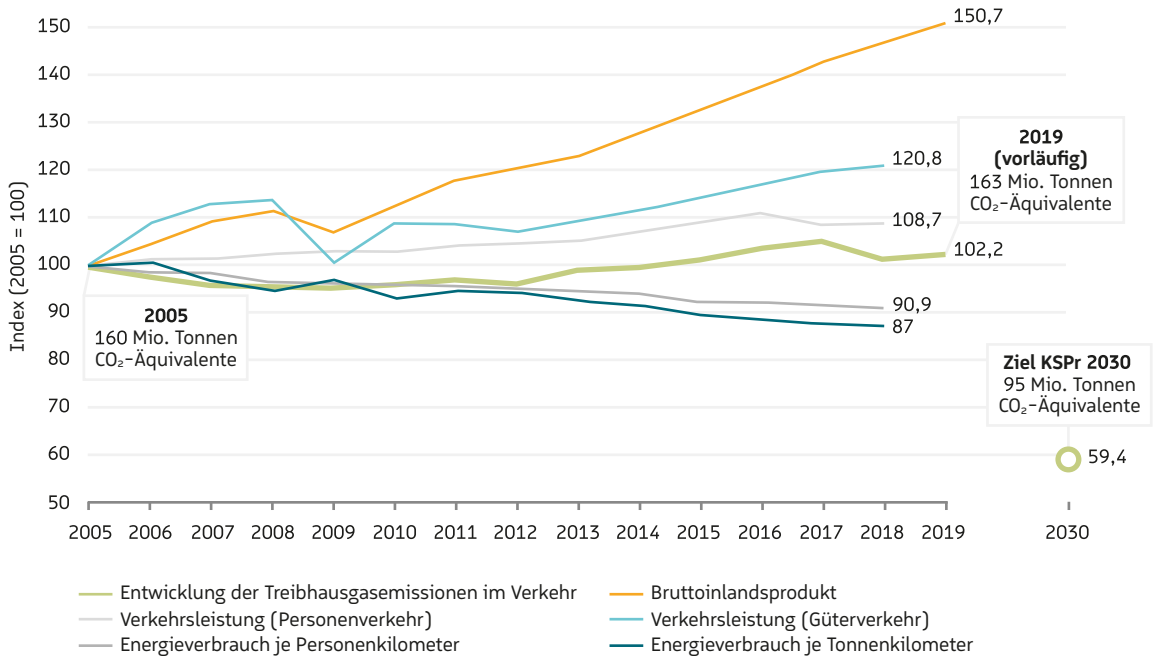


Abbildung 1: Entwicklung der Treibhausgasemissionen im nationalen Güterverkehr
(Quelle: Darstellung TUHH-VPL nach Destatis (2020), Destatis/ifeu (2020), KBA/BMVI (2019), UBA (2019c))

1 NUTZFAHRZEUGE UND DEREN RELEVANZ ZUR ERREICHUNG DER KLIMASCHUTZZIELE

- Die Fahrleistung der Nutzfahrzeuge (Nfz) verursacht derzeit circa ein Drittel der CO_2-Emissionen im Verkehrsbereich.[2] Besonders der heute zu mehr als 99 % durch Diesel angetriebene schwere Güterfernverkehr ist aufgrund der hohen Fahrleistung Hauptverursacher der CO_2-Emissionen im Straßengüterverkehr. Circa 38 Millionen Tonnen CO_2 pro Jahr (Mio. t CO_2/a) werden von schweren Nutzfahrzeugen (SNF) mit einem zulässigen Gesamtgewicht größer 3,5 t verursacht – mit zuletzt steigender Tendenz (siehe Abbildung 2).
- Im Rahmen des **Klimaschutzprogramms wurde im Handlungsfeld „Nutzfahrzeuge" eine Minderung um 17 bis 18 Mio. t CO_2-Äquivalente als Ziel für 2030 formuliert**. Dieses Minderungsziel wurde mit der Maßgabe versehen, dass etwa ein Drittel der Fahrleistung im schweren Straßengüterverkehr bis 2030 elektrisch oder auf Basis strombasierter Kraftstoffe erbracht werden soll.

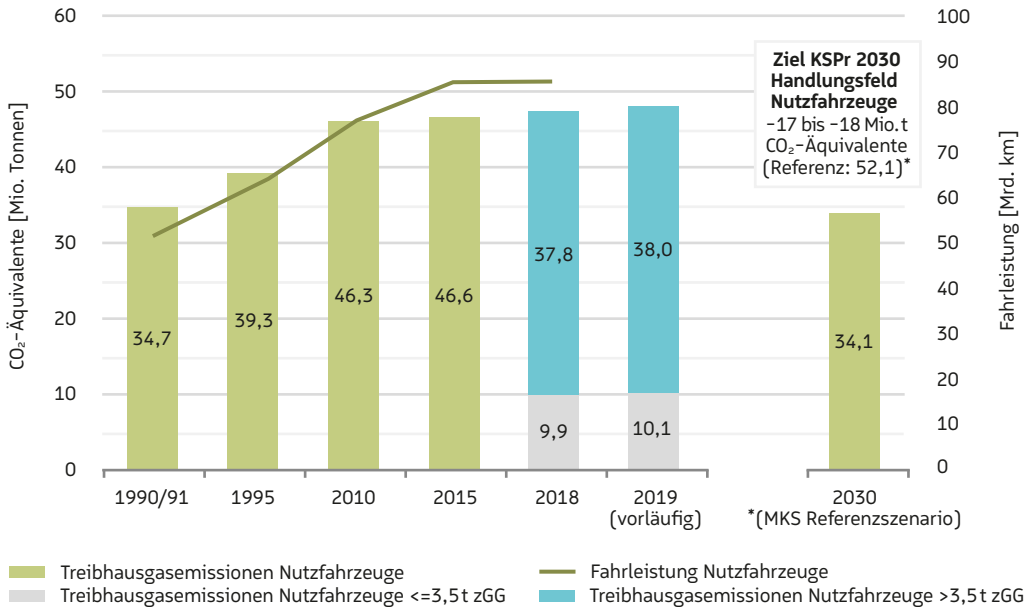
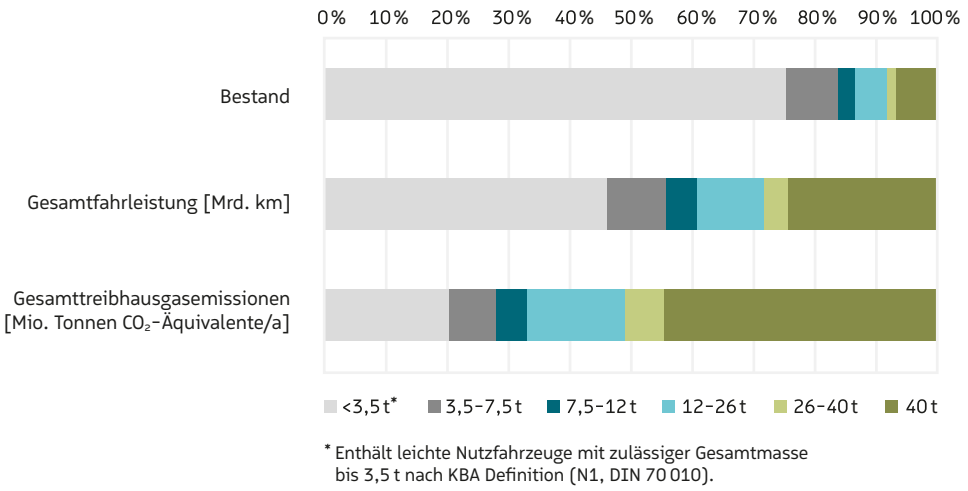


Abbildung 2: CO_2-Emissionen und Fahrleistung inländischer Lastkraftwagen (Lkw) im Straßengüterverkehr 1990–2019
(Quelle: Darstellung TUHH-VPL und eigene Berechnungen M-Five nach BMVI (2019), Bundesregierung (2019), KBA/BMVI (2019), Schade et. al. (2018), UBA (2019a))

- Die Verteilung der CO_2-Emissionen (siehe Abbildung 3) zeigt zunächst, dass weniger als 10 % aller **Nfz im Bestand über mehr als 26 t zulässiges Gesamtgewicht verfügen, aber etwa die Hälfte der Emissionen der Nfz verursachen**. Hingegen machen die leichten Nutzfahrzeuge (LNF) bis 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht rund 75 % im Bestand aus, sie erbringen aber rund 20 % der THG-Emissionen im Nutzfahrzeugbereich.

2 BMU (2020)



* Enthält leichte Nutzfahrzeuge mit zulässiger Gesamtmasse bis 3,5 t nach KBA Definition (N1, DIN 70 010).

Abbildung 3: Bestand, Fahrleistung und CO_2-Emissionen von Nutzfahrzeugen in Deutschland im Jahr 2016 nach zulässigem Gesamtgewicht (Quelle: Fraunhofer ISI (2018))

- Für die Einsetzbarkeit verschiedener Antriebstechnologien im Nfz-Bereich ist eine **Reihe von Kriterien** zu berücksichtigen, **die für die Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit der Transport-, Speditions- und Logistikbranche**[3] **sowie ihrer Auftraggeber als einem die gesamtwirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit signifikant bestimmenden Wirtschaftszweig von Bedeutung sind**.
- Neben den **technologischen Anforderungen** sind hier zuvorderst **Planungs- und Investitionssicherheit maßgebend, um neue Antriebstechnologien etablieren zu können**. Eine Technologiefokussierung in den jeweiligen Einsatzbereichen ist daher aus Sicht der Nutzerinnen und Nutzer dringend erforderlich, lässt sich jedoch nach derzeitigem technologischen Kenntnisstand nicht verlässlich empfehlen.
- **Ebenso wichtig ist die Berücksichtigung der systemischen Rahmenbedingungen:**
  - Der Nfz-Bereich ist durch eine **große Heterogenität** gekennzeichnet. Hinsichtlich der technischen Spezifikationen der Fahrzeuge (unterschiedliche Gewichtsklassen, Bauarten etc.) und der Einsatzfelder (Nah-, Regional- und Fernverkehr, Art der transportierten Güter etc.) gibt es **enorme Unterschiede. Die parallele Entwicklung mehrerer Technologiepfade zur CO_2-Reduktion** im Nfz-Bereich ist unter anderem auf diese Heterogenität der Anforderungen zurückzuführen.
  - Die Transport- und Logistikbranche als Nutzer neuer Antriebstechnologien **agiert grenzüberschreitend**. Sie ist durch eine **zunehmende Internationalisierung** mit vielfältigen Zulieferbeziehungen der Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsprozesse von Industrie und Handel geprägt.
  - Die Beschaffung und Distribution von Waren und Gütern ist immer stärker auf kurzfristige Nachfrageschwankungen und Produktvarianten ausgerichtet und erfolgt teilweise über immer längere Distanzen. **Dadurch nehmen die Arbeitsteilung in der Branche, die Bedeutung von Flexibilität und der Wettbewerbsdruck zu**. Standortspezifische Faktoren, wie beispielsweise **unterschiedliche Abgaben- und Steuerlasten**, sind entscheidende Faktoren für Unternehmen in der Transport- und Logistikbranche. Dies spiegelt sich insbesondere im stetig wachsenden Anteil ausländischer Güterverkehrsleistung im Straßengüterverkehr wider.[4]

3 Hiermit sind sowohl der gewerbliche Güterkraftverkehr als auch die Werkverkehre gemeint.

4 Laut gleitender Mittelfristprognose 2019/20 des BMVI beträgt der Anteil ausländischer Lkw an der Straßengüterverkehrsleistung in Deutschland 2019 rund 42 % (Intraplan Consult (2020)).

- Der vorliegende Werkstattbericht analysiert – unter anderem auf Basis der von der Bundesregierung beauftragten aktuellen Gutachten des Öko-Instituts und Prognos – welchen Beitrag die Maßnahmen des Klimaschutzpakets leisten können, um im Nfz-Bereich eine nachhaltige CO_2-Reduktion zu erzielen.
- **Dabei fokussiert dieser Werkstattbericht gemäß der oben genannten Maßgabe des KSPr 2030 auf die folgenden technologischen Pfade der Elektrifizierung für schwere Nfz (SNF):**
  - **Batterieelektrische Antriebe (BEV-Lkw),**
  - **Wasserstoff-Brennstoffzellentechnologie (H_2-BZ-Lkw) und**
  - **Oberleitungs-Hybride (OH-Lkw).**
- Bei leichten Nfz (LNF) bis 3,5 t zulässigem Gesamtgewicht (zGG) sind bereits ähnlich wie im Personenkraftwagen (Pkw)-Bereich massenmarktfähige batterieelektrische Konzepte verfügbar beziehungsweise absehbar.
- Dieser Bericht gibt Einblick in die laufende Arbeit der AG 1 und fokussiert das Handlungsfeld „Antriebswechsel Nutzfahrzeuge“. Er ist im übertragenen Sinne als Werkstattbericht zu verstehen, dessen Kernergebnisse in einen Handlungsfeld-übergreifenden Synthesebericht der AG 1 im kommenden Jahr 2021 einfließen werden.
- Ziel des Werkstattberichts ist ein besseres Verständnis über **die zur Verfügung stehenden technologischen Elektrifizierungsvarianten für SNF**, deren Reifegrade sowie die notwendigen operativen Schritte für einen Hochlauf im Zeitraum bis 2030 und die Beleuchtung geeigneter Instrumente und Maßnahmen. Diese werden von der AG 1 in einem **möglichen Fahrplan** mit Technologieoptionen visualisiert.
- Dieser mögliche Fahrplan zur Erreichung der KSPr-2030-Ziele zeigt, dass die technologischen Elektrifizierungsvarianten für SNF maßgeblich erst in der zweiten Hälfte dieses Jahrzehnts beginnen werden, ihre CO_2-reduzierende Wirkung zu entfalten. Daher geht der Werkstattbericht auch auf weitere kurzfristig wirkende Ansätze der Dekarbonisierung im schweren Güterverkehr ein. Diese werden überblicksartig dargestellt und weisen Schnittstellen zum Handlungsfeld „Alternative Kraftstoffe“ auf, zu dem der gesonderte Werkstattbericht „Klimawirkungen und Wege zum Einsatz alternativer Kraftstoffe“ ebenfalls Ende des Jahres erscheint.

2 WEGE ZUR ELEKTRIFIZIERUNG IM NUTZFAHRZEUGSEKTOR

- Um den Einsatz elektrischer Antriebe im Nfz-Bereich zur CO_2-Reduktion zu fördern, **hat das KSPr 2030 eine Reihe von Maßnahmen genannt**. Die Maßnahmen befinden sich teilweise noch in unterschiedlichen Ständen der Umsetzung und Konkretisierung.
- Die Maßnahmen des KSPr 2030 lassen sich in verschiedene Kategorien aufteilen:

TECHNISCHE PARAMETER:	• Digitalisierung und Automatisierung (S. 82) • Effizienzstandards, CO_2-Flottenregulierung (EU-Ebene) für LNF und SNF (S. 80)
BEPREISUNG:	• CO_2-Differenzierung Lkw-Maut (S. 80) • Nationales Emissionshandelssystem (S. 24ff.)
INFRASTRUKTURAUFBAU UND FÖRDERUNG:	• Ausbau der Tank-, Lade- und Oberleitungsinfrastruktur (hierzu auch: Masterplan Ladeinfrastruktur) (S. 80) • Entwicklungsförderung marktreifer Nfz mit H_2-BZ (S. 80f.) • Anschaffungsförderung durch Kaufprämien (S. 80) • Sonderabschreibungen für Elektrolieferfahrzeuge (S. 84) • Erleichterungen bei der Gewerbesteuer bei Miete und Leasing von Elektrofahrzeugen (S. 84)

Tabelle 1: Kategorisierung der im Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr 2030) genannten Maßnahmen
(Quelle: Eigene Darstellung)

- Um die Gesamtminderungswirkung des Programms inklusive der Wechselwirkungen zwischen einzelnen Maßnahmen und dem denkbaren Effekt der CO_2-Bepreisung bei einem linearen Anstieg[5] bewerten zu lassen, hat die Bundesregierung nach Beschluss des KSPr 2030 die Gutachterinnen und Gutachter des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) mit Untersuchungen beauftragt.
- Auf **Bitte des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI)** hat die AG 1 diese Untersuchungen hinsichtlich der Methodik und Parametrisierung näher analysiert (siehe Kapitel 2.1) und basierend auf dieser Analyse einen möglichen Fahrplan zur Erreichung der Ziele des KSPr 2030 entwickelt (siehe Kapitel 2.2).
- Darüber hinaus hat die AG 1 für die in diesem Fahrplan betrachteten Technologieoptionen die **Vermeidungskosten** und die **Total Cost of Ownership (TCO)** analysiert. Die Betrachtung von Vermeidungskosten (siehe Kapitel 2.3) adressiert die **volkswirtschaftliche** Perspektive und dient als ein Entscheidungskriterium für die Politik, während die Betrachtung der TCO (siehe Kapitel 2.4) die **betriebswirtschaftliche** Perspektive wiedergibt. Insbesondere letztere erlaubt die Abschätzung der Wirksamkeit politischer Steuerungsinstrumente. Eine transparente Darstellung zentraler Modellierungen und Parameter findet sich im **Anhang**.

5 Das nationale Emissionshandelssystem nach dem Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) könnte ab 2026 bei einer echten Deckelung der jährlich festgelegten Emissionen zu deutlich höheren CO_2-Preisen führen, die auch stärker als der lineare Verlauf ansteigen dürften. Die Gutachten des Öko-Instituts und von Prognos gehen in ihren Modellierungen hingegen von einer Deckelung der CO_2-Preise bis 2030 aus und bilden dabei eine kontinuierliche Steigerung des CO2-Preises ab.

2.1 VERGLEICH DER GUTACHTEN VON ÖKO-INSTITUT IM AUFTRAG DES BMU UND VON PROGNOS IM AUFTRAG DES BMWI

- Die seit Frühjahr 2020 vorliegenden Gutachten des Öko-Instituts et al. im Auftrag des BMU und des UBA[6] und von Prognos et al.[7] im Auftrag des BMWi sind keine Zielszenarien, sondern sie bewerten die zu erwartende THG-Minderungswirkung des KSPr 2030 unter Berücksichtigung der mit Stand Januar 2020 (in Teilen) beschlossenen beziehungsweise konkret absehbaren politischen Rahmenbedingungen.
    - **Beide Gutachten kommen zu dem Ergebnis, dass – unter den zum Stand Januar 2020 gültigen Rahmenbedingungen und bereits umgesetzten Maßnahmen – im Jahr 2030 eine CO_2-Lücke im Verkehr bestehen bleibt**. Prognos errechnet die Zielerreichung im Jahr 2035 durch die Maßnahmen des KSPr 2030 im Verkehrssektor.
    - Bei der detaillierten Analyse der Gutachten zeigt sich jedoch, dass **sich die beiden Gutachten in der Spezifikation der zentralen Instrumente für den Antriebswechsel bei Nfz deutlich unterscheiden**.
- Das Gutachten des Öko-Institut berücksichtigt ausschließlich Instrumente aus dem KSPr 2030, die in ihren Details ausformuliert sind, und geht von einer Restriktion bei der Verfügbarkeit von Lkw (> 3,5 t zGG) mit alternativen Antrieben am Markt aus. Prognos berücksichtigt ein größeres Spektrum der Instrumente aus dem KSPr 2030, indem fehlende Details durch eigene Annahmen ergänzt werden oder zusätzliche Informationen durch den Auftraggeber (BMWi) bereitgestellt werden (siehe Tabelle 2). Prognos erwartet die Verfügbarkeit alternativer, elektrifizierter Lkw[8] im Zeitraum 2020 bis 2025. In beiden Gutachten spielen Liquefied-Natural-Gas(LNG)-Lkw aufgrund fehlender spezifischer Anreize keine Rolle.
- Das Gutachten von Prognos legt für den Hochlauf von Oberleitungs-Hybrid-Lkw die Ergebnisse aus Drittstudien zugrunde, sodass dieser unabhängig von der gewählten Ausgestaltung der Instrumente ist.
- Beide Gutachten kommen zu dem Schluss, dass sich unter anderem aufgrund der Deckelung der CO_2-Preise und der limitierten Verfügbarkeit im Jahr 2030 keine größeren Mengen fortschrittlicher Biokraftstoffe oder strombasierter Kraftstoffe zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs einstellen.
- Die folgende Tabelle listet die zentralen Instrumente aus dem KSPr 2030 auf und stellt die unterschiedlichen Spezifikationen in den jeweiligen Gutachten gegenüber:

6 UBA (2020)

7 Prognos/ Fraunhofer ISI/ GWS/ iinas (2020)

8 Die Verfügbarkeit von batterieelektrischen Lkw wird in den nächsten fünf Jahren hauptsächlich bei kleineren Fahrzeugeinheiten (bis 18 t zGG) erwartet, welche primär im Regional- und Verteilverkehr eingesetzt werden.

INSTRUMENT	ÖKO-INSTITUT	PROGNOS
ÜBERGEORDNETE INSTRUMENTE		
CO_2-Bepreisung ohne Handelssystem	Nominal: 25-55-125 €/t, wirkt bis 2030 auf Dieselpreis	Nominal: 25-55-180 €/t, wird bei Lkw über Maut berücksichtigt
EEG-Abschlag von bis zu 3 ct/kWh	berücksichtigt	berücksichtigt
INSTRUMENTE FÜR SCHWERE NUTZFAHRZEUGE		
CO_2-gespreizte Maut: CO_2-Aufschlag	Indirekt modelliert über CO_2-Preis auf Kraftstoff (25-55-125 €/t)	In Teilen berücksichtigt*: CO_2-Preis ab 2023 100 €/t bis 180 €/t in 2030
CO_2-gespreizte Maut: 75 % Abschlag bei Infrastruktur-Maut für Null-Emissions-Lkw (ZE)	Nicht berücksichtigt	In Teilen berücksichtigt*
Aufbau und Förderung von Energieinfrastruktur Lkw (Anteil von 3,5 Mrd. € bis 2023)	Nicht berücksichtigt, kein Aufbau von Mega-Chargern oder Oberleitungen für Lkw	Aufbau von 2000 km Oberleitung an BAB bis 2030 (900 Mio. € bis 2023), danach weitere Förderung
Kaufprämie von 40 % der Mehrkosten für ZE-Lkw	Geringfügig berücksichtigt, da Restriktion bei Verfügbarkeit	In Teilen berücksichtigt*
Lkw-Mautanpassung 2019: Alle Bundesstraßen plus Lärm Lkw ab 7,5 t zGG 40-50 % Mauterhöhung Diesel-Lkw (> 18 t zGG)	Keine Wirkung, da Teil von Referenz- und KSPr-Szenario	In Teilen berücksichtigt*
INSTRUMENTE FÜR LEICHTE NUTZFAHRZEUGE (TEILS BIS 7,5 T ZGG)		
Sonderabschreibung von 50 % im ersten Jahr für ZE-LNF (gilt bis 7,5 t)	Nicht berücksichtigt	Nicht berücksichtigt
Kaufprämie von 40 % der Mehrkosten für ZE-LNF	Orientierung an Zielerreichung CO_2-Standards, LNF (keine Übererfüllung)	Berücksichtigt Förderung bis 2030 verlängert
Markthochlauf elektrifizierter LNF (BEV)	2030 Anteil Neuzulassungen: 20 % elektrische Fahrleistung: 8 %	2030 Anteil Neuzulassungen: 47 % 2030 Bestand BEV: 34 %

Tabelle 2: Vergleichende Gegenüberstellung Öko-Institut/Prognos: Bewertung der Instrumente
(Quelle: Eigene Darstellung)

* Aufgrund von Beschränkungen in der Modellierung

- In beiden Gutachten wird der CO_2-Preis entweder über die Maut oder über den Kraftstoff berücksichtigt, sodass **es zwar nicht zu einer Doppelbelastung durch einen CO_2-Preis auf Kraftstoff und Maut kommt**, sich die unterstellten Preisimpulse aber in der Höhe unterscheiden. Bei der Anlastung des CO_2-Preises über den Kraftstoff sind jedoch Wettbewerbsverzerrungen im europäischen Straßengüterverkehr zu bedenken.
- Die Anpassung der Mauthöhe ab 2019 ist insofern von Bedeutung, da (1) aufgrund der deutlichen Mauterhöhung für dieselbetriebene Lkw Zero-Emission(ZE)- und Liquefied-Natural-Gas(LNG)-Lkw aufgrund der Mautbefreiung

stark begünstigt werden und (2) damit ein erheblicher Lenkungseffekt (auch auf Lkw von 7,5 bis 12 t zGG) erzielt werden kann.

- Zentral für den Hochlauf elektrifizierter Nfz ist die Revision der Eurovignetten-Richtlinie, bei der der CO_2-Preis auf Nfz mit Verbrennungsmotor und ein Infrastrukturabschlag für ZE-Nfz in die Mautsätze integriert werden können. Mit Umsetzung der revidierten Eurovignetten-Richtlinie in 2023 kann so ein wirksamer Kaufanreiz für elektrifizierte Nfz gesetzt werden, ohne den Wettbewerb im europäischen Straßengüterverkehr negativ zu beeinflussen. Ein früher Markthochlauf elektrifizierter Antriebe führt zu einem höheren Bestand in 2030.
- Beide Gutachten nutzen eine **TCO-Modellierung für die Kaufentscheidung** und damit auch für die Modellierung der Hochlaufkurven alternativer SNF. Das bedeutet, dass eine Kaufentscheidung als 0/1-Entscheidung – basierend auf Gesamtkosten – unterstellt wird und immer das TCO-günstigste Lkw-Modell je Nutzerprofil gekauft wird. Die Güte eines TCO-Modells für 2030 und noch nicht am Markt etablierte Technologien hängt neben den getroffenen Annahmen für die Parameter von der Anzahl der differenzierten Nutzerprofile ab. Es können auch weitere Eigenschaften wie Käuferprofile (zum Beispiel risikoavers, Haltedauer) berücksichtigt werden. Der Zeitpunkt, zu dem Lkw mit alternativen Antriebstechnologien am Markt verfügbar sind, **wird für die TCO-Modellierung exogen gesetzt**. Damit kann auch die Restriktion der Marktverfügbarkeit so gesetzt werden, dass diese erst nach 2030 in den Markt kämen.
  - Die Studie des Öko-Instituts berücksichtigt prinzipiell eine hohe Anzahl von Nutzer- und Käuferprofilen. Im KSPr 2030-Szenario wurde aber für alle Lkw-Gewichtsklassen ab 3,5 t zGG **die Restriktion einer mangelnden Verfügbarkeit** am Markt gesetzt. Deswegen diffundieren selbst für Nfz mit 3,5 bis 7,5 t zGG oder Nfz mit 7,5 bis 16 t zGG keine batterieelektrischen Antriebe in die Flotte.
  - Das Prognos-Gutachten unterscheidet nur wenige Nutzerprofile.
- Auch aufgrund fehlender finanzieller Anreize zum Stand Januar 2020 (Maut, Infrastrukturförderung) geht die Studie des Öko-Instituts davon aus, dass Lkw mit alternativen Antrieben vorerst nicht in den Markt dringen. Im Gegenzug werden Effizienzverbesserungspotenziale von Verbrennungsmotoren voll ausgeschöpft, was eine Effizienzverbesserung der konventionellen Lkw-Antriebe (Diesel, LNG) von heute bis 2030 um 20 % im Lkw-Bestand und damit die Zielerreichung der CO_2-Standards ausschließlich durch Effizienzgewinne bewirkt.
- Im Prognos-Gutachten führt die Ausgestaltung einer CO_2-gespreizten Lkw-Maut zum Hochlauf alternativer Antriebe (59.000 OH-Lkw) basierend auf einer Drittstudie. Ermöglicht wird dies durch parallele Infrastrukturförderung für den Aufbau einer OH-Infrastruktur (2.000 Kilometer (km) bis 2030), was durch die Förderung sowohl von Fahrzeugen als auch von Infrastrukturaufbau vor und nach 2023 umgesetzt wird. Die Effizienzverbesserung der neuen Lkw mit Verbrennungsmotoren von heute bis 2030 führt zu einer Verbesserung der CO_2-Emissionen der Lkw-Bestandsflotte um 11 %. Im Prognos-Gutachten werden die Ziele der CO_2-Standards neuer Lkw durch eine Kombination von Effizienz bei Verbrennungsmotoren und Elektrifizierung erreicht.
- Bei der Analyse der beiden Gutachten wurden in diesem Werkstattbericht die Prämissen und Modellierungen auf ihre Stichhaltigkeit und Aktualität (zum Beispiel Bewertung der Potenziale der Effizienzverbesserung von Lkw mit Verbrennungsmotor (ICE-Lkw)) überprüft. Es wurden einige relevante Ansatzpunkte identifiziert, die die Prognosegüte hinsichtlich der CO_2-Minderungspotenziale des KSPr 2030 bei einer Neu-Modellierung verbessern könnten.
  - Für eine erneute Bewertung wird eine **Konkretisierung zentraler Instrumente** (zum Beispiel insbesondere die CO_2-gespreizte Lkw-Maut ab 2023, Fördermittel für Infrastrukturaufbau, Höhe und Dauer der Kaufprämie für alle Nfz-Klassen) empfohlen. Ferner bedarf es einer **Erweiterung der Nutzerprofile** (Gewichtsklassen und Fahrleistungsklassen) in der Prognos-Modellierung sowie einer **Neu-Bewertung des Hochlaufs** der alternativen Lkw und der THG-Minderung unter Berücksichtigung der konkretisierten Instrumente.
  - **Im Ergebnis der gewählten Instrumentierung und Modellierung werden in beiden Gutachten die heute bereits absehbaren Potenziale alternativer, elektrifizierter Lkw, besonders in den Gewichtsklassen 3,5 t bis 26 t zGG, nicht ausgeschöpft.**

2.2 DARSTELLUNG VERSCHIEDENER TECHNOLOGIE-OPTIONEN UND NOTWENDIGER SCHRITTE FÜR EINE FOKUSSIERUNG ZUM MARKTHOCHLAUF – EIN MÖGLICHER FAHRPLAN ZUR ERREICHUNG DER ZIELE DES KSPR 2030

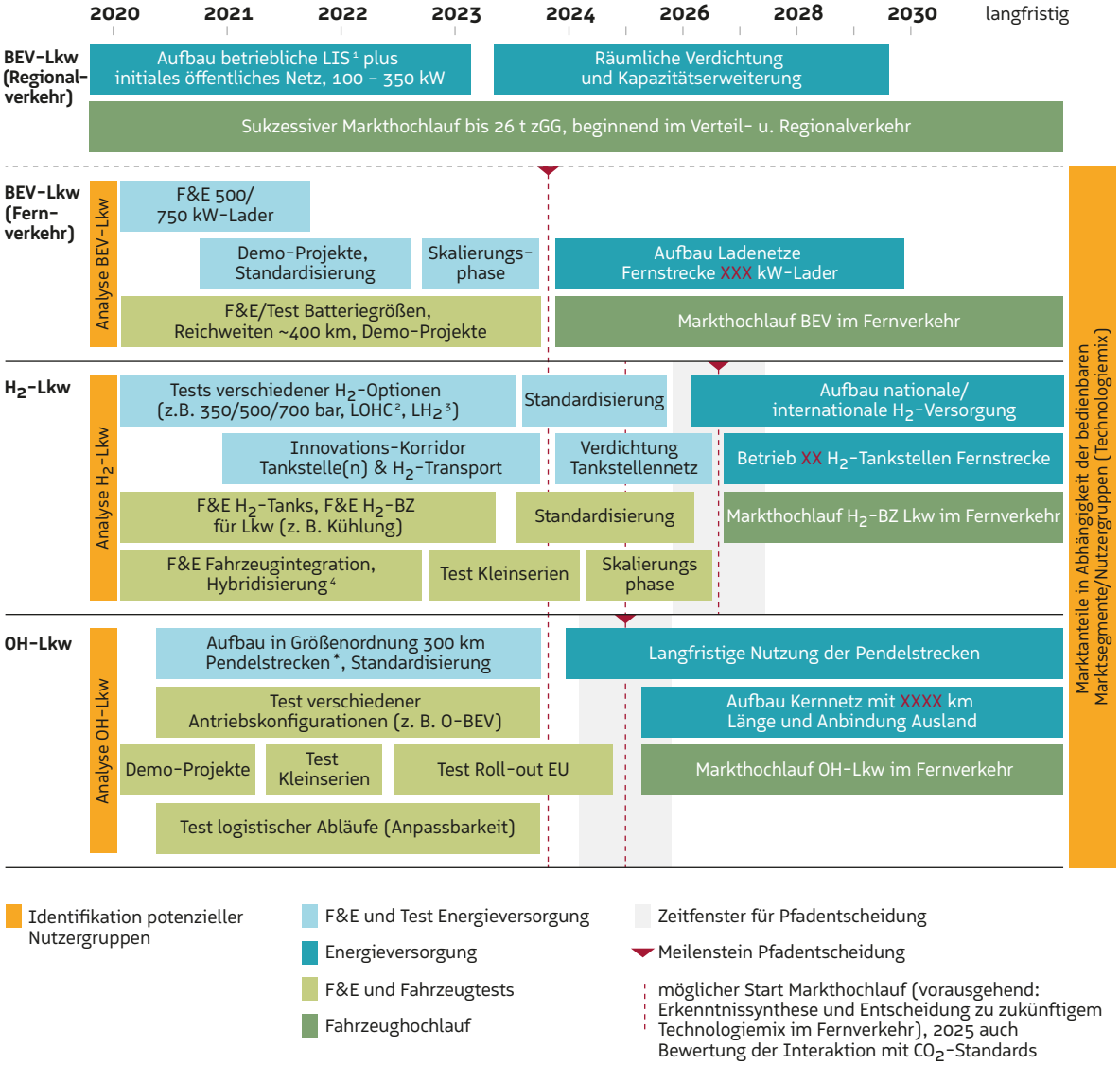
- Die Transport- und Logistikbranche ist durch starken internationalen und vor allem innereuropäischen Wettbewerbsdruck geprägt. Die Komplexität von Logistikprozessen und deren internationale Netzwerke müssen bei der Bewertung von Technologieoptionen berücksichtigt werden. **Derzeit fehlt es noch an ausreichender Praxiserfahrung, um die unterschiedlichen Technologieoptionen im Schwerlastbereich hinreichend beurteilen zu können** – zum Beispiel im Hinblick auf internationale Anwendbarkeit und damit Wettbewerbsfähigkeit oder die Integration in komplexe Logistikprozesse. Aufgrund der Unsicherheiten bezüglich des zukünftigen Technologiepfads, deutlich höherer Anschaffungskosten und der mangelnden Fahrzeugverfügbarkeit sind Investitionen in Fahrzeuge mit emissionsfreien Antrieben aktuell kaum möglich. Für Fahrzeuganbieter ist zu bedenken, dass das Verfolgen mehrerer Technologiepfade kostenintensiv und mit einer unattraktiven Fragmentierung des Markts verbunden ist.
- Aufgrund des ambitionierten Klimaziels in 2030 (Reduktion von 42 %) werden heute noch alle infrage kommenden technologischen Alternativen für die Elektrifizierung verfolgt. Das sind: Batterieelektrische Lkw (BEV), Lkw mit Wasserstoff und Brennstoffzelle (H_2-BZ) und Oberleitungs-Hybrid-Lkw (OH), wobei auch Kombinationen dieser Optionen möglich sind.
- Die vorgenommenen Abschätzungen und Berechnungen haben ergeben, dass das Verfolgen nur eines Technologiepfads nicht ausreichend ist, um das Klimaziel 2030 erreichen zu können (Ausführungen dazu im Anhang ab S. 41). **Nur ein Technologiemix erscheint derzeit als erfolgsversprechender Lösungsansatz**, da dann die für die Zielerreichung notwendigen Hochlaufkurven der jeweiligen Technologien in den als technologisch machbar geltenden Größenordnungen liegen. Alle drei Technologien weisen unterschiedliche Reifegrade auf, sowohl bei den Fahrzeugen als auch hinsichtlich ihrer Infrastruktur zur Energieversorgung.
- **Jedoch kann eine Technologiefokussierung mittelfristig sinnvoll sein, um die technische Machbarkeit im Sinne der Skalierung und eine Reduktion des gesamten Investitionsvolumens zu erwirken. Um mittelfristig Entscheidungen zum Antriebsportfolio – basierend auf fundiertem Wissen und Praxiserfahrung – treffen zu können, sind weitere Untersuchungen und Marktentwicklungsmaßnahmen in den verschiedenen Varianten der Elektrifizierung von Nfz durchzuführen.**
- Um die potenziell möglichen Technologiepfade (BEV-, H_2-BZ-, OH-Lkw) und deren Marktreife sowie deren infrastrukturellen Rahmenbedingungen zu beleuchten und einzelne notwendige Handlungsschritte zu identifizieren, wurde der nachfolgende mögliche **Fahrplan** mit Technologieoptionen entwickelt.
- **Darin visualisiert sind zeitliche Abhängigkeiten von Entwicklungsschritten, Zeiträume für Pfadentscheidungen gemäß dem iterativen Ansatz. Das ermöglicht, Handlungsempfehlungen bezüglich geeigneter Instrumente für den Markthochlauf der jeweiligen Technologieoptionen abzuleiten.**

ZUM MÖGLICHEN FAHRPLAN:

- Es besteht Konsens, dass der **BEV-Lkw** für den Verteil- und Regionalverkehr geeignet und für diese Einsatzbereiche ab dem Jahr 2021 am Markt erwartet wird. Deswegen wurde für den Verteil- und Regionalverkehr der Aufbau passender Ladeinfrastruktur und der Markthochlauf ab 2020 dargestellt. Dieser Markthochlauf wird ebenfalls unterstützt durch Förderprogramme aus dem KSPr 2030 bis zum Jahr 2023.

Der Fahrplan ist in **vier Phasen** strukturiert:

- **Die erste Phase des Fahrplans von 2020 bis 2023** dient für alle drei betrachteten Technologien dazu, Forschungs- und Entwicklungsprojekte (F&E) sowohl zu Infrastruktur als auch zu Fahrzeugen durchzuführen, Demo- oder Kleinserien-Projekte zu betreiben, technische Fragen zu klären und so auch zu dringend benötigten Normungen und Standardisierungen zu gelangen. Zugleich sollte diese Phase genutzt werden, um für BEV-Lkw bereits mit dem Aufbau einer ersten flächendeckenden Ladeinfrastruktur auf Basis der bestehenden Standards (Combined Charging System (CCS) mit 350 kW) zu beginnen und dabei den Übergang auf höhere Ladeleistungen vorzubereiten.
- Zum Abschluss dieser ersten Phase wird erwartet,
  - dass die offenen Fragen zum Markthochlauf von schweren BEV geklärt werden konnten (zum Beispiel maximale Leistung der Schnelllader, Batteriegrößen und -technologie zur Erzielung einer Reichweite von 350 bis 400 km, Standardisierung der Stecker und Oberleitungstechnologie, Zertifizierungsprozesse, Anforderungen an Netzanschluss), sodass Hersteller in eine Serienproduktion einsteigen können und andere Akteure einschließlich des Bundes ein für SNF ausgelegtes Schnellladenetz an den Fernstraßen und Depotladepunkte herbeiführen beziehungsweise ausbauen.
  - dass im Bereich geeigneter Pendelstrecken Oberleitungsinfrastruktur für OH-Lkw mit einer Länge von circa 300 km aufgebaut sind, um unter Einbeziehung bereits bestehender Teststrecken einen umfangreichen Praxistest mit Fokus auf logistische Abläufe in Kombination mit verschiedenen Antriebskonfigurationen (zum Beispiel Diesel-Hybrid, BEV-Hybrid, LNG-Hybrid , BZ-Hybrid, Batteriegrößen) zu ermöglichen, der gleichzeitig auch Hinweise auf weitere offene Fragen im Zusammenhang mit dieser Technologie gibt.
  - dass für H_2-BZ-Lkw grundsätzliche technische Fragen zur Betankung, Speicherung und Versorgung geklärt sein werden (zum Beispiel Nutzung von Flüssig-H_2 und/oder Druck-H_2 und Festlegung der Druckstufe).
  - dass die Erkenntnissynthese Hinweise geben wird, welche Fragen für BEV-Lkw, H_2-BZ-Lkw und für OH-Lkw noch zu lösen sind.
- **In der zweiten Phase von 2024 bis 2025** ist nach derzeitigem Wissensstand zu erwarten, dass für H_2-BZ-Lkw eine Festlegung auf die Form des zu nutzenden Wasserstoffs und die Nutzung in Kleinserien und die Standardisierung vorangetrieben wird. Für den OH-Lkw ist parallel zur weiteren Nutzung der Pendelstrecken, der Erfahrungsaustausch mit Feldversuchen in anderen Ländern sowie die Frage einer Netzerweiterung und eines Roll-outs in europäische Nachbarländer zu klären und voranzutreiben. Auch für BEV-Lkw und H_2-BZ-Lkw sind Fragen grenzüberschreitender Kompatibilität wichtig, wobei die Nutzfahrzeughersteller nach derzeitigem Stand von einer weltweiten Produktion dieser Antriebskonzepte ausgehen, was den grenzüberschreitenden Einsatz und den Aufbau entsprechender Infrastruktur – unter Voraussetzung notwendiger Standardisierungsprozesse – beschleunigen dürfte.
- Zum Ende dieser Phase etwa in 2025 erfolgt eine zweite Erkenntnissynthese, die – bei jeweils positiver Bewertung – für H_2-BZ-Lkw in eine nächste Stufe der Skalierung der Technologie führt und bei OH-Lkw einen weiteren Ausbau des Oberleitungsnetzes und damit einen Markthochlauf der OH-Lkw empfehlen könnte. Alternativ hierzu könnte in dieser Phase eine stärkere Technologiefokussierung stattfinden, nach der Technologien nicht zum flächendeckenden Markthochlauf geführt würden.
- **Die dritte Phase ab 2026 bis 2027** dient bei positiver Technologiebewertung vor allem dem Aufbau einer kostengünstigen Versorgung mit grünem Wasserstoff aus nationalen oder internationalen Quellen (im industriellen Maßstab) und der Klärung weiterer Skalierungsfragen der H_2-BZ-Technologie. Am Ende der Phase soll in 2027 die H_2-Versorgung, die Tankstellen und die Produktion von H_2-BZ-Lkw geklärt sein, sodass die Erkenntnissynthese eine Entscheidungsfindung zum Hochlauf der H_2-BZ-Lkw ermöglicht.
- **In der vierten Phase nach 2027** würde dann je nach zuvor getroffenen Pfadentscheidungen ein weiterer Markthochlauf der positiv bewerteten Technologien erfolgen.



1 LIS = Ladeinfrastruktur
2 LOHC = Liquid Organic Hydrogen Carrier
3 LH_2 = Liquid Hydrogen
4 H_2-ICE werden auch getestet, sind hier aber nicht aufgeführt, da kein elektrifizierter Antriebsstrang eingesetzt wird.
* Wird nicht von allen Mitgliedern der AG befürwortet.

Abbildung 4: Darstellung verschiedener Technologieoptionen und notwendiger Schritte zum Markthochlauf: Ein möglicher Fahrplan zur Erreichung der Ziele des KSPr 2030
(Quelle: Eigene Darstellung)

2.3 BETRACHTUNG DER THG-VERMEIDUNGSKOSTEN

- Vermeidungskosten werden im Vergleich zu einer Referenz bestimmt, hier dem SNF mit Dieselantrieb, und setzen sich zusammen aus den Differenzkosten zum Diesel und den eingesparten Treibhausgasemissionen gegenüber der Nutzung eines vergleichbaren Dieselfahrzeugs.

$$\text{Vermeidungskosten} = \frac{\Sigma\ \text{Differenzkosten zu Diesel-Lkw}}{\Sigma\ \text{THG-Einsparung gegenüber fossilem Diesel}}$$

- Berücksichtigt werden in den Differenzkosten alle relevanten monetären Kosten inklusive Investitionen unabhängig davon, ob diese beim Staat, beim Infrastrukturaufbau oder bei der Lkw-Nutzung anfallen. Alle Kostenkomponenten werden ohne staatliche Einflüsse durch Steuern und Abgaben berücksichtigt (zum Beispiel keine Energiesteuer und Stromsteuer, Umsatzsteuer oder Maut). Marktähnlich bestimmte Kostenkomponenten werden berücksichtigt (zum Beispiel Netzentgelte, EEG-Umlage[9]) unter Wahrung der Technologieneutralität (das heißt identisch für alle drei Technologien).[10] Spezifische Randbedingungen der Nutzung der Technologien wurden in Abstimmung mit den Akteuren parametrisiert (zum Beispiel Anteil Schnellladen von BEV, Anteil elektrische Fahrleistung bei OH-Lkw). Als Systemgrenze der energetischen Betrachtung ist die Einspeisung des erneuerbaren Stroms in die jeweilige Energieinfrastruktur gewählt (das heißt Ladesäule, Oberleitung, Elektrolyseur).
- Investitionen langlebiger Güter (das heißt Fahrzeuge und Energieinfrastruktur) werden über die Lebensdauer annuisiert und die Annuitäten für jede betrachtete Jahresscheibe aggregiert. Dabei wird ein volkswirtschaftlicher Zinssatz von 2 % genutzt.
- Die fahrzeugbezogenen Vermeidungskosten[11] sind stark abhängig von den drei Faktoren **Fahrzeugpreis, Energieinfrastruktur und Energiekosten**. Die drei Faktoren fallen je nach Technologie unterschiedlich ins Gewicht.
- **Zentrale Ergebnisse: Die BEV- und OH-Lkw weisen mit den aktuell getroffenen Prämissen** (siehe Informationskasten S. 22) **die geringsten Vermeidungskosten auf. Durch technologische Entwicklung und staatliche Gestaltung bei marktähnlichen Komponenten können die Vermeidungskosten stark beeinflusst werden.**

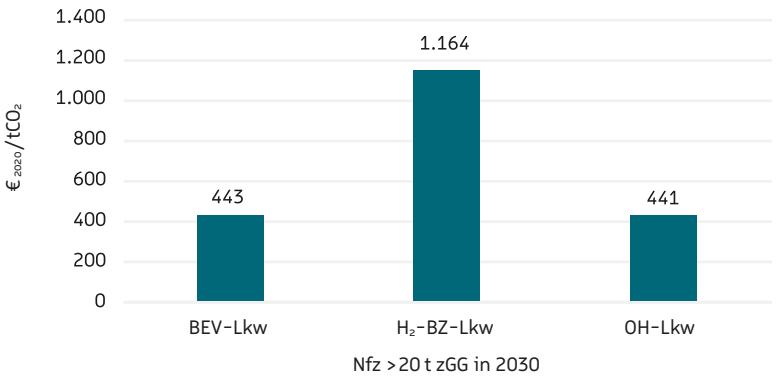


Abbildung 5: CO_2-Vermeidungskosten alternativer Nfz > 20 t in 2030
(Quelle: Eigene Berechnungen: M-Five, TUHH-VPL mit Input von NPM-Mitgliedern)

9 Die EEG-Umlage ist in allen drei Technologieoptionen (BEV-, OH-, H_2-BZ-Lkw) über den Strompreis abgebildet (bei H_2 im Rahmen des für die Elektrolyse benötigten Stroms).

10 Die Berechnung der volkswirtschaftlichen Vermeidungskosten folgt dem Ansatz aus dem The Boston Consulting Group/Prognos-Gutachten „Klimapfade für Deutschland" (2018) im Auftrag des BDI.

11 In dieser Analyse wurde bei der Vermeidungskostenberechnung eine einheitliche Fahrzeugkombination (generische Fahrzeugkombination > 20 t zGG) angenommen. Die Vermeidungskosten können bei intermodalen Transportketten und anderen Fahrzeugkombinationen variieren. Diesen Aspekt wird die AG 1 in der Zusammenführung mit dem Handlungsfeld „Schienenverkehr" berücksichtigen.

- Bei der Betrachtung der Komponenten der Vermeidungskosten wird deutlich, dass beim H_2-BZ-Lkw insbesondere die hohen Energiekosten für Wasserstoff und die hohen Anschaffungskosten die deutlich höheren Vermeidungskosten erklären.

Zentrale konstante Parameter der Berechnung

Jahresfahrleistung: Gliederzug: 100.000 km/a, Sattelzug (SZ): 114.000 km/a

Lebensdauer Fahrzeuge:

Gliederzug: 10 Jahre, Sattelzug: 6 Jahre

Lebensdauer Infrastruktur:

Ladestation: 20 Jahre, Oberleitung: 20 Jahre, Elektrolyseur: 10 Jahre, Tankstellen: 20 Jahre

Versicherungskosten: 1,5 % der Fahrzeugpreise

Anteil Bezug von öffentlichen Schnellladestrom bei BEV: Gliederzug: 20 %, Sattelzug: 30 %

Zeitabhängige Parameter sind im Anhang erklärt.

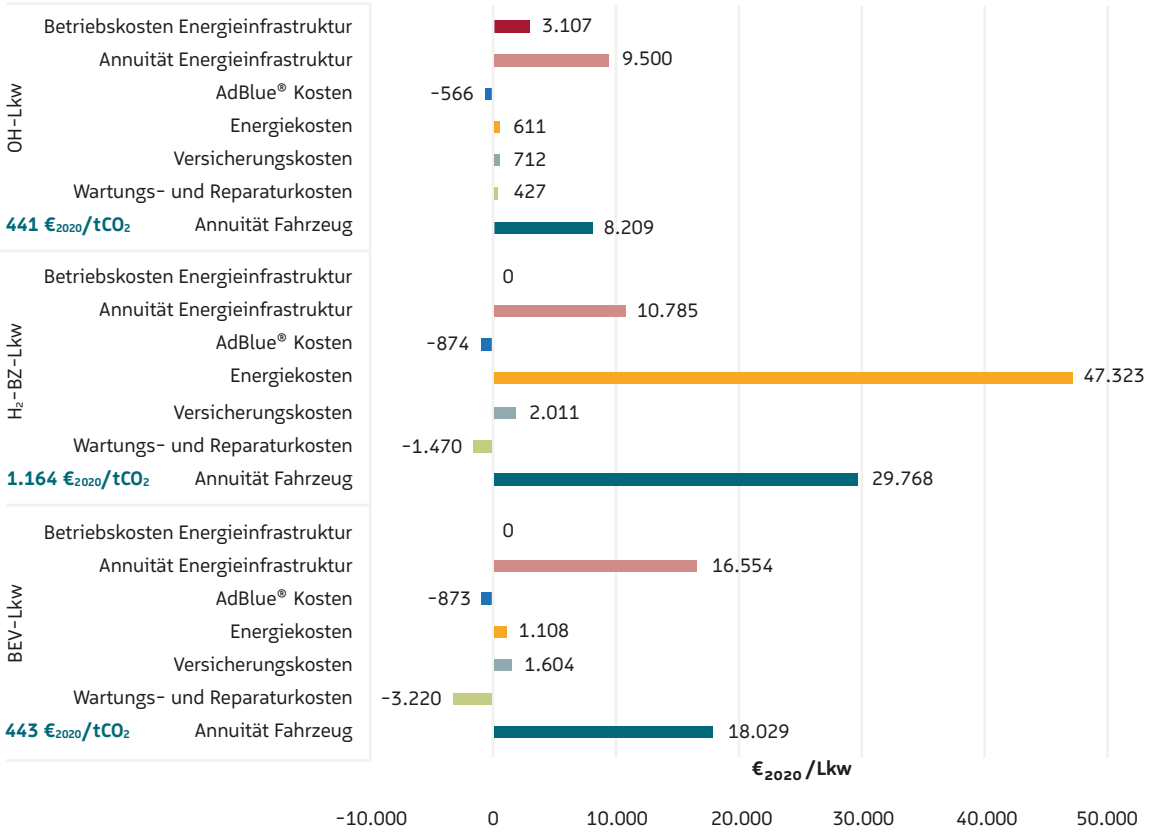


Abbildung 6: Komponenten der Vermeidungskosten Nfz > 20 t zGG
(Quelle: Eigene Berechnungen: M-Five, TUHH-VPL mit Input von NPM-Mitgliedern)[12]

12 Betriebskosten der Infrastruktur für H_2-BZ-Lkw und für BEV-Lkw sind in den Energiekosten enthalten und daher mit Null ausgewiesen.

2.4 BETRACHTUNG DER TOTAL COST OF OWNERSHIP (TCO) UND WICHTIGER STAATLICHE INSTRUMENTE ZUR FÖRDERUNG ELEKTRISCHER ANTRIEBE BEI SCHWEREN NUTZFAHRZEUGEN

- Entscheidungen in der Transport- und Logistikbranche sind aufgrund des herrschenden Wettbewerbsdrucks sehr stark TCO-abhängig.
- Im Fokus der folgenden TCO-Rechnungen steht keine exakte Kostenprognose der Gesamtkosten des Betriebs von verschiedenen Antriebstechnologien im Jahr 2030, **sondern eine Abschätzung der Wirksamkeit staatlicher Steuerungsinstrumente im Allgemeinen und deren Ausgestaltung im Besonderen**. Die vorgenommenen TCO-Rechnungen zeigen auf, wie die betriebswirtschaftlichen Kosten der verschiedenen Antriebstechnologien durch staatliche Instrumente beeinflusst werden. Die betriebliche Einsatzfähigkeit der Technologieoptionen ist bei der Kostenbetrachtung nicht berücksichtigt worden.
- In den TCO-Rechnungen sind Kosten aus Investitionen als Annuität in Euro pro Jahr (€/a) ausgewiesen. Für die Berechnungen sind die realen Preise für 2030 mit dem Basisjahr 2020 und für die Instrumentengestaltung die nominalen Preise verwendet worden.
- Eine TCO-Rechnung erfasst die Fahrzeugbetriebskosten. Bezogen auf alle Antriebsarten stellen die Fahrerkosten hierbei den größten jährlichen Kostenfaktor dar. Die Fahrerkosten stellen circa 50 % der jährlichen Gesamtkosten dar und liegen bei rund 66.000 €.

Die folgenden TCO-Rechnungen umfassen die aufgeführten Parameter in Euro pro Jahr (€/a):

- Annuität Anschaffungspreis (Fahrzeugpreis mit Zuschuss und mit Sonder-Abschreibung (Sonder-Afa)[13])
- Versicherungskosten
- Kraftfahrzeug (Kfz)-Steuer
- Energiekosten (mit EEG-Umlage)
- Energiesteuer und Stromsteuer
- AdBlue® (für Diesel und anteilig für OH-Lkw)
- Wartungs- und Reparaturkosten
- Kosten für Ausfalltage
- Mautkosten

13 Afa: Absetzung für Abnutzung

TCO OHNE STAATLICHE STEUERUNGSINSTRUMENTE

- Den Referenzwert bildet der Diesel-Sattelzug, für den die reinen Technologiekosten, das heißt die Fahrzeugpreise bei der Anschaffung und beim Betrieb ohne staatliche Steuerungsinstrumente (also ohne Zuschüsse und Abgaben wie Energiesteuer, Stromsteuer, EEG-Umlage in den Energiekosten, Kfz-Steuer und Maut), ermittelt werden. Dieser erste Schritt wurde gemacht, um zunächst eine reine Technologiekostenbetrachtung vornehmen zu können. Bei BEV wird im ersten Schritt eine Ladeinfrastrukturerstanschaffung (private 50 kW-Ladestation für 38.300 €) berücksichtigt, um die Auswirkung auf die Kostenverhältnisse zu zeigen. Im weiteren Referenzszenario bleiben die öffentlichen Ladeinfrastrukturkosten (BEV, OH und H_2) unberücksichtigt, da es sich um Erstanschaffungskosten handelt, die derzeit durch das Instrument des Aufbaus der Tank- und Ladeinfrastruktur gefördert werden. [14]

Bei den reinen Technologiekosten für das Fahrzeug wurde für die Energiekosten (ohne EEG-Umlage, ohne Energiesteuer und ohne Stromsteuer) ein Dieselpreis von 61,73 ct_{2020}/l, ein Strompreis von 5,94 ct_{2020}/kWh (Hochspannungsnetz) und ein Wasserstoffpreis von 5,85 $€_{2020}$/kg H_2 verwendet.

- Die reinen Technologiekosten der alternativen Antriebe sind in der relativen Differenz zum Diesel-Lkw zunächst mit höheren jährlichen Kosten verbunden, sodass der Diesel-Lkw kostengünstiger ist.

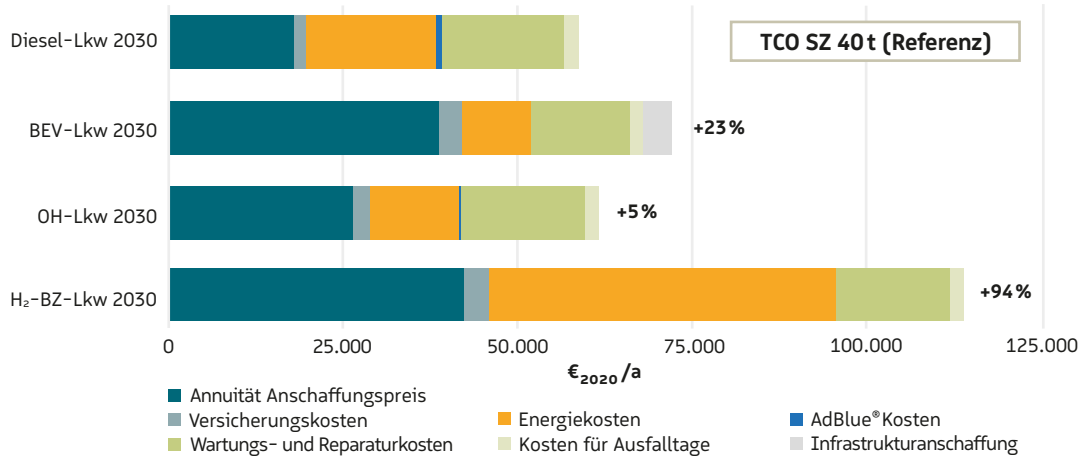


Abbildung 7: TCO 2030 ohne staatliche Steuerungsinstrumente
(Quelle: Eigene Berechnungen TUHH-VPL und M-Five mit Input von NPM-Mitgliedern)

14 Die Ausgestaltung des Aufbaus der Tank- und Ladeinfrastruktur als noch zu konkretisierendes Instrument im KSPr 2030 ist noch zu betrachten. Auch die Kosten für die öffentliche Hand sind noch zu analysieren.

Bei stärker sinkenden Fahrzeugpreisen bis zum Jahr 2030 (vgl. Sensitivität) liegen die reinen Technologiekosten des BEV- und OH-Lkw knapp unter denen des Diesel-Lkw, die des H_2-BZ-Lkw aber immer noch darüber (siehe Abbildung 8).

Fahrzeugpreise 2030	Diesel	BEV-Lkw	OH-Lkw	H_2-Lkw	
Sattelzugmaschine (SZ 40t)	102.800 €	220.000 €	150.000 €	240.000 €	Referenz
		135.000 €	118.000 €	160.000 €	Sensitivität

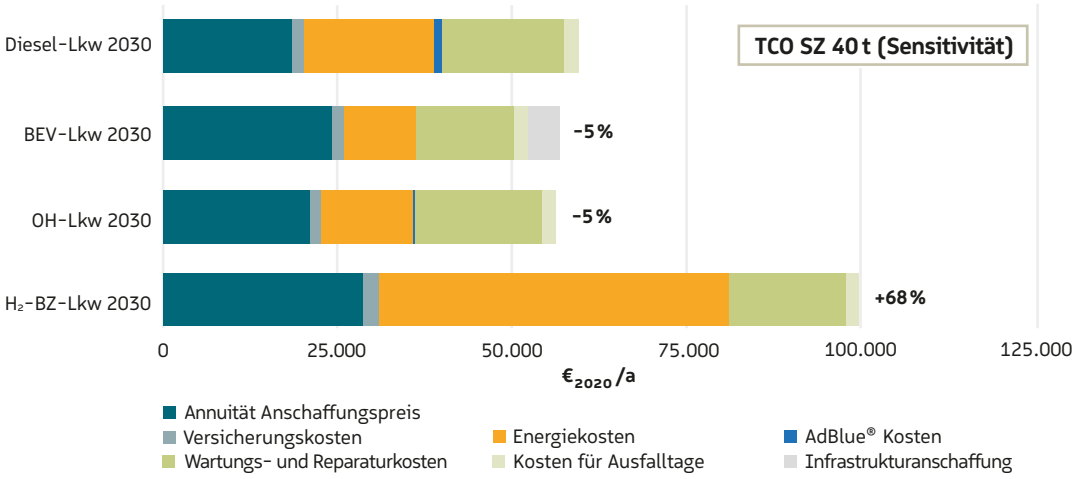


Abbildung 8: TCO 2030 ohne staatliche Steuerungsinstrumente mit sinkenden Fahrzeugpreisen
(Quelle: Eigene Berechnungen TUHH-VPL und M-Five mit Input von NPM-Mitgliedern)

TCO MIT STAATLICHEN STEUERUNGSINSTRUMENTEN

- **Es gibt eine Reihe staatlicher Steuerungsinstrumente, welche die Anschaffung und den Betrieb beeinflussen können.** Dazu gehören:
  - **Zuschüsse auf Investitionsmehrkosten und Sonder-AfA,**
  - **Energiesteuer und Stromsteuer,**
  - **die EEG-Umlage als Bestandteil der Energiekosten,**
  - **die Kfz-Steuer und**
  - **die Maut.**

Folgende zentrale Bestandteile sind in die Berechnung eines Referenzszenarios mit staatlichen Steuerungsinstrumenten eingeflossen:

- Anschaffungspreise mit 80 % Zuschuss auf Investitionsmehrkosten und Sonder-AfA (50 %) für BEV und H_2-BZ-Lkw [15]
- Energiekosten (mit EEG-Umlage)
- Energiesteuer und Stromsteuer (ohne Mehrwertsteuer (MwSt.))
- Kfz-Steuer (Kfz-Steuerbefreiung für ZE-Nfz)
- Mautkosten mit CO_2-gespreizter Maut
  - CO_2-Preis: 100 €/t CO_2
  - Infrastrukturkomponente der Maut: derzeit je nach Gewichtsklasse 11,5 bzw. 17,4 ct/km; Abschlag der Infrastrukturkomponente für ZE-Nfz: 75 %
  - Zuschlag für Luftverschmutzung: 1,1 ct/km (Diesel Euro VI)
  - Zuschlag für Lärmbelästigung: 0,2 ct/km (alle Antriebe)

Eine detaillierte Darstellung der Berechnungsgrundlagen und Parametrisierung befindet sich im Anhang.

Für die realen Energiekosten (Referenzpreis mit EEG-Umlage, Energiesteuer und Stromsteuer separat ausgewiesen) wurde ein Dieselpreis von 61,73 ct_{2020}/l, ein Strompreis von 12,01 ct_{2020}/kWh (Hochspannungsnetz) und ein Wasserstoffpreis von 8,71 $€_{2020}$/kg H_2 verwendet. Bei der realen Energiesteuer und Stromsteuer (ohne MwSt.) wurde zwischen der Energiesteuer von 40,53 ct_{2020}/l und der Stromsteuer von 1,32 ct_{2020}/kWh unterschieden. Für den Endverbraucherpreis von H_2 wurde keine zusätzliche Energiebesteuerung vorgenommen (bei der Herstellung ist die Stromsteuer enthalten).

15 Die Ausgestaltung des Bezuschussungszeitraums und die Frage einer möglichen Obergrenze sind noch zu konkretisieren. Auch die Kosten für die öffentliche Hand sind noch zu analysieren.

In der folgenden Abbildung 9 sind die Ergebnisse der betrachteten Fahrzeuggrößenklassen im Referenzszenario dargestellt.

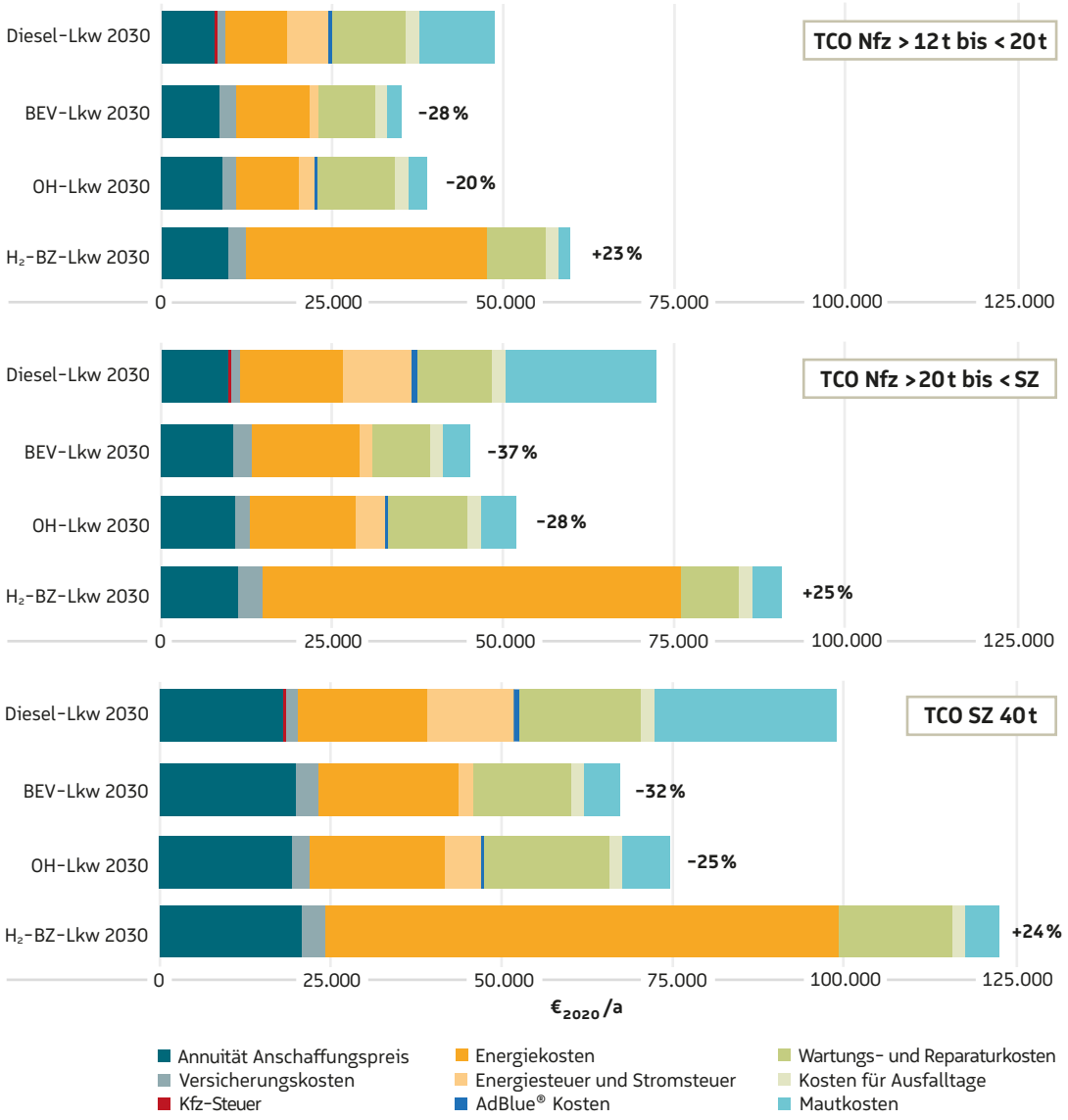


Abbildung 9: Referenzszenario mit staatlichen Steuerungsinstrumenten
(Quelle: Eigene Berechnungen TUHH-VPL und M-Five mit Input von NPM-Mitgliedern)

- **Kernergebnisse:**
  - BEV- und OH-Lkw weisen bei den zugrunde gelegten Prämissen die geringsten jährlichen Gesamtkosten auf.
  - Die Wettbewerbsfähigkeit der Technologieoptionen kann durch die staatlichen Steuerungsinstrumente entscheidend beeinflusst werden.
  - Die staatlichen Instrumente führen dazu, dass die Förderung der Investitionsmehrkosten die Unterschiede in den Fahrzeuganschaffungskosten zunächst weitgehend ausgleichen.
  - Bei der TCO-Betrachtung (ohne Fahrerkosten) sind zwar die Wartungs- und Reparaturkosten ein wichtiger Bestandteil, jedoch werden Kostenvorteile oder -nachteile zwischen den Technologien durch größere Unterschiede in anderen Parametern (insbesondere Energiekosten) überlagert.
  - Die Energiebesteuerung durch die Energiesteuer und Stromsteuer führt zu deutlichen Unterschieden in den Gesamtenergiekosten, da sie in sehr unterschiedlicher Höhe für die verschiedenen Antriebe anfällt. Die Wettbewerbsfähigkeit des H_2-BZ-Lkw ist entscheidend von den Gesamtenergiekosten abhängig. Mit einem Faktor 2,4 bis 3,25 im Vergleich zu den anderen Antriebstechnologien sind die Energiekosten beim H_2-BZ-Lkw der größte Kostenblock.
  - Ein zentrales Instrument ist die CO_2-abhängige Lkw-Maut, da diese das Kostenverhältnis der alternativen Antriebe zum Diesel-Lkw deutlich beeinflusst.

TCO MIT STAATLICHEN STEUERUNGSINSTRUMENTEN: SENSITIVITÄTEN

- Für die Bewertung der zentralen Steuerungsinstrumente wurde die Sensitivität der CO_2-gespreizten Maut und die damit verbundene Mautausgestaltung am Beispiel des Sattelzugs dargestellt. Zusätzlich zu der Mautgestaltung ist die Sensitivität des Zuschusses auf Investitionsmehrkosten im oberen und unteren Teil der Matrix differenziert dargestellt. Auf der rechten Seite sind für den H_2-BZ-Lkw zwei verschiedene H_2-Preise angenommen worden mit einem H_2-Preis (Endabnahmepreis) von 8,71 (= Referenz) beziehungsweise 4,57 €$_{2020}$/kg H_2 (= Import). Die Ergebnisse sind im Vergleich zu der relativen Differenz in den Gesamtkosten zum Diesel dargestellt. In der Mitte findet sich der Wert des jeweiligen Referenzwerts und anliegend die Werte der Mautausgestaltungsvarianten.
- Für die Sensitivität wurden drei CO_2-Preise und drei Abschläge auf die Infrastrukturkomponente für die alternativen Antriebe am Beispiel eines Sattelzugs untersucht. Der CO_2-Preis ist in der Matrix vertikal mit 65 € (in Anlehnung an das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) 2026), 100 €/t CO_2 als Referenz und 180 €/t CO_2 als Sensitivität dargestellt (2030 entsprechend mit 56 €$_{2020}$/t CO_2, 86 €$_{2020}$/t CO_2 und 155 €$_{2020}$/t CO_2) und der Mautabschlag der Infrastrukturkomponente für den BEV-, OH- und H_2-BZ-Lkw in der horizontalen mit 100 %, 75 % und 50 % Abschlag differenziert.

TCO SZ 40t Relative Differenz zu Diesel geringere Kosten: -% höhere Kosten: +%			BEV-Lkw 2030			OH-Lkw 2030			H_2-Versorgung: H_2-BZ-Lkw 2030 (Referenz)			H_2-Versorgung: H_2-BZ-Lkw 2030 (Import)		
			Mautabschlag der Infrastrukturkomponente											
			100 %	75 %	50 %	100 %	75 %	50 %	100 %	75 %	50 %	100 %	75 %	50 %
Zuschuss auf Investitionsmehrkosten	80 %	CO_2-Preis in der Maut: 65 €	-36 %	-31 %	-26 %	-28 %	-24 %	-19 %	22 %	27 %	32 %	-15 %	-10 %	-5 %
		100 €	-37 %	-32 %	-27 %	-29 %	-25 %	-20 %	19 %	24 %	29 %	-17 %	-12 %	-7 %
		180 €	-40 %	-36 %	-31 %	-31 %	-27 %	-22 %	13 %	17 %	22 %	-21 %	-16 %	-12 %
	40 %	65 €	-26 %	-21 %	-16 %	-25 %	-20 %	-15 %	34 %	39 %	44 %	-2 %	3 %	8 %
		100 €	-27 %	-22 %	-18 %	-26 %	-21 %	-16 %	31 %	36 %	41 %	-5 %	0 %	5 %
		180 €	-31 %	-26 %	-22 %	-28 %	-24 %	-19 %	24 %	29 %	34 %	-9 %	-5 %	0 %

Abbildung 10: Berechnung der Sensitivitäten bei unterschiedlichen Mautvarianten, H_2-Preisen und Investitionskostenzuschüssen
(Quelle: Eigene Berechnungen TUHH-VPL und M-Five mit Input von NPM-Mitgliedern)

- Es zeigt sich, dass der **Mautabschlag einen größeren Kostenhebel für die alternativen Antriebe** darstellt als der Aufschlag durch den CO_2-Preis beim Diesel-Lkw, da die Infrastrukturkomponente einen höheren Anteil an den Mautgesamtkosten hat.

Am Beispiel des Sattelzugs (mehr als vier Achsen) beträgt die Infrastrukturkomponente nominal 17,4 ct/km. Durch den Mautabschlag von 75 % wird die Infrastrukturkomponente für die alternativen Antriebe auf 4,4 ct/km reduziert, was einem Mautabschlag von 13 ct/km entspricht. Der Aufschlag für einen vergleichbaren Sattelzug durch einen CO_2-Preis von nominal 100 €/t CO_2 (2030 entsprechend real 86 €$_{2020}$/t CO_2) führt zu einem CO_2-Aufschlag von 7,1 ct/km (2030 entsprechend 6,1 ct$_{2020}$/km).

- **Der CO_2-Preis hat jedoch eine wichtige Signalwirkung** und bringt in Verbindung mit einem höheren Mautabschlag auf die Infrastrukturkomponente den größten Vorteil für die alternativen Antriebe.
- Eine **Erhöhung des Zuschusses von 40.000 €** (maximal 40 % der Investitionsmehrkosten) bei BEV-Lkw und H_2-BZ-Lkw auf 80 % der Investitionsmehrkosten führt zu circa 10 % niedrigeren jährlichen Kosten beim Sattelzug (unter Annahme, dass der Zuschuss von 80 % im Gegensatz zur heutigen Förderung nicht nach oben begrenzt ist).
- Beim **H_2-BZ-Lkw wirkt der H_2-Energiepreis stärker als die Mautgestaltung** aufgrund des hohen relativen Anteils der Energiekosten an den Gesamtkosten und bestimmt maßgeblich mögliche Mehrkosten oder Kosteneinsparungen im Vergleich zum Diesel-Lkw.
- Basierend auf den zuvor dargestellten H_2-Preisvarianten wurden für den H_2-BZ-Lkw Sensitivitäten mit verschiedenen H_2-Preisen berechnet: im Referenzfall mit 8,71 $€_{2020}$/kg H_2 und im Importfall mit 4,57 $€_{2020}$/kg H_2. In dieser zweiten Sensitivität ist davon auszugehen, dass die Strompreise im Falle von Wasserstofferzeugung an Erneuerbare Energien(EE)-Gunststandorten niedriger sind als bei der nationalen Herstellung.
- Für die BEV-Lkw wurde ebenfalls eine Sensitivität bestimmt (nicht in der Abbildung dargestellt, siehe Anhang), in Abhängigkeit davon, ob der Strom aus dem Hochspannungs- oder dem Mittelspannungsnetz entnommen wird. Für eine Abnahme aus dem Mittelspannungsnetz wurde im Jahr 2030 ein Aufschlag von 1,5 ct_{2020}/Kilowattstunde (kWh) angenommen, wodurch sich der Strompreis auf 13,51 ct_{2020}/kWh (ohne Stromsteuer) erhöht.
- Es zeigt sich, dass der H_2-BZ-Lkw erst bei sehr niedrigen H_2-Preisen und den angenommenen Steuerungsinstrumenten wettbewerbsfähig im Vergleich zum Diesel-Lkw und den anderen alternativen Antrieben sein kann. Der entscheidende Einflussfaktor ist der Versorgungspfad – das heißt zum Beispiel, ob H_2 in Deutschland oder an Gunststandorten hergestellt und die EEG-Umlage berücksichtigt wurde – und der damit verbundene H_2-Energiepreis.[16] Beim BEV führt die unterschiedliche Stromentnahme aus dem Hochspannungs- oder Mittelspannungsnetz zu 2 % höheren TCO (ohne Fahrerkosten) im Vergleich zum Diesel-Lkw.

Abschließend lässt sich aus den TCO-Rechnungen ableiten: **Der Technologiehochlauf und damit die Wettbewerbsfähigkeit alternativer Antriebsformen wird bereits durch viele staatliche Instrumente beeinflusst. Sie stehen als wirksame Steuerungsinstrumente zur Verfügung und nehmen – in der konkretisierten Ausgestaltung – einen wichtigen und entscheidenden Einfluss.**

16 Allerdings würden die TCO der direktelektrischen Optionen (BEV-, OH-Lkw) ebenfalls weiter sinken, wenn die EEG-Umlage – im Sinne eines Level-Playing-Fields – auch für sie entfiele.

3. WEITERE ANSÄTZE ZUR DEKARBONISIERUNG DES SCHWEREN GÜTERVERKEHRS

- Aus der vorangegangenen Analyse eines möglichen Fahrplans zu Elektrifizierungsoptionen bei **schweren Nutzfahrzeugen** ist die **Problematik** ersichtlich, dass insbesondere in der **ersten Hälfte dieses Jahrzehnts nur eine geringe Anzahl von Fahrzeugen** > 26 t zGG am Markt verfügbar sein wird und hier noch kein signifikanter CO_2-Minderungsbeitrag erbracht werden kann. Im Bereich LNF und SNF < 26 t zGG dagegen ist durch eine bessere Fahrzeugverfügbarkeit von BEV-Lkw ein schnellerer Fortschritt bei der Elektrifizierung zu erwarten.
- Daher werden in diesem Kapitel weitere – auch kurzfristig wirkende – Ansätze zur Dekarbonisierung des schweren Güterverkehrs betrachtet. Dazu gehören unter anderem:
  - die Optimierung von Lkw-Ausstattungskomponenten und von Trailern,
  - die Förderung von Verlagerung und kombiniertem Verkehr (KV), die KV-Fähigkeit von Trailern (siehe dazu zukünftige Ergebnisse zum Handlungsfeld „Schienenverkehr“) sowie Reduktion von Fahrleistung unter anderem durch Digitalisierung und
  - die Nutzung gasförmiger fossiler Kraftstoffe (LNG/CNG[17]) sowie Biogas.
- Perspektivisch ist auch der Einsatz strombasierter und fortschrittlicher biogener Kraftstoffe zu betrachten (siehe hierzu auch den Werkstattbericht „Klimawirkungen und Wege zum Einsatz alternativer Kraftstoffe“).
- Das Thema der Verkehrsvermeidung wurde in diesem Bericht nicht betrachtet und ist in der zukünftigen AG-Arbeit weiter zu vertiefen.

NUTZUNG GASFÖRMIGER KRAFTSTOFFE IM VERBRENNUNGSMOTOR

- Die Frage der **Nutzung gasförmiger Kraftstoffe** im Verbrennungsmotor für Nfz als eine weitere Alternative zum Diesel-Nfz wird **sehr kontrovers diskutiert**. Diese aktuell einzige am Markt für SNF verfügbare mögliche Alternative zum Diesel-Lkw ist sofort einsetzbar. Sie könnte daher nach Einschätzung einiger AG-Mitglieder kurz- und mittelfristig bereits in der ersten Hälfte des Jahrzehnts CO_2-reduzierend wirken und daher als Teil einer Lösungsstrategie zur CO_2-Reduktion dienen. Dem gegenüber gibt es auch Positionen, die sich gegen den Einsatz gasförmiger Kraftstoffe im Nfz-Bereich aussprechen, unter Verweis auf klimaschädliche Methan-Emissionen sowie die Gefahr von langfristig kontraproduktiven Lock-in-Effekten[18]. Eine Gegenüberstellung zentraler Pro- und Kontra-Argumente in tabellarischer Form findet sich weiter unten.
- Zu den gasbetriebenen Nfz gehören:
  - Nfz mit komprimiertem Methan (CNG) und mit verflüssigtem Methan (LNG), das dann nach Verfügbarkeit durch Bio- und synthetisches Methan ersetzt werden kann.
  - Als weitere denkbare Variante gelten Nfz, die (grünen) Wasserstoff (H_2) im Verbrennungsmotor nutzen.

17 CNG: Compressed Natural Gas

18 Die AG 1 Mitglieder BUND und NABU machen klar, dass die fossilen Kraftstoffe LNG und CNG aus Sicht von Umweltverbänden keinen Ansatz zur Dekarbonisierung darstellen. Grund dafür ist unter anderem der Methanschlupf mit seiner enormen negativen Klimawirkung.

- **Hier zeigt sich, dass die Handlungsfelder „Antriebswechsel Nutzfahrzeuge“ und „Alternative Kraftstoffe“ Schnittstellen aufweisen, die später in einer handlungsfeld- und sektorenübergreifenden Gesamtbetrachtung Berücksichtigung finden müssen. Dies betrifft insbesondere die Frage der ausreichenden mengenmäßigen Verfügbarkeit alternativer, auf erneuerbaren Energien basierender gasförmiger Kraftstoffe zu wettbewerbsfähigen Preisen. Auch die Diskussion um die ausreichende Verfügbarkeit/Nutzungskonkurrenzen biogener Ausgangsstoffe wird thematisiert werden.**
- Ohne dem Werkstattbericht „Klimawirkungen und Wege zum Einsatz alternativer Kraftstoffe“ und der Frage der Nutzung gasförmiger Kraftstoffe vorzugreifen, listet die nachfolgende Tabelle **die wichtigsten Pro- und Kontra-Argumente** auf, um an dieser Stelle für die Komplexität und die zu beachtenden Aspekte zu sensibilisieren, ohne eine Empfehlung auszusprechen.

ARGUMENTE FÜR DIE (KURZ- UND MITTELFRISTIGE) NUTZUNG GASFÖRMIGER KRAFTSTOFFE IM VERBRENNUNGSMOTOR	ARGUMENTE GEGEN EINE NUTZUNG GASFÖRMIGER KRAFTSTOFFE IM VERBRENNUNGSMOTOR
• Seit wenigen Jahren leisten CNG- und LNG-betriebene Nfz einen ersten Beitrag zur Dekarbonisierung im Bereich der SNF, da diese im Vergleich zu konventionellen Dieselfahrzeugen weniger CO_2 ausstoßen. • Wenn die genutzten gasförmigen Kraftstoffe nicht mehr – wie heute größtenteils noch – aus fossilen Quellen erzeugt werden, sondern anteilig oder vollständig regenerativ aus Biomasse oder erneuerbarem Strom, könnten auch diese Technologien die CO_2-Emissionen der Nfz bei einer End-of-pipe-Betrachtung deutlich reduzieren.[19] • Zentral ist hierfür die Reduktion des Methanschlupfs in der Prozesskette.	• Um die Klimawirkung von Methan-betriebenen Nfz zu beurteilen, sind neben den CO_2-Emissionen aus der Verbrennung auch Verluste von Methan (CH_4) entlang der Nutzungskette zu berücksichtigen. Dabei ist CH_4 28- bis 30-mal treibhauswirksamer als CO_2.[20][21] Ein 3,5%iger Verlust an CH_4 („Methanschlupf“) in die Atmosphäre würde eine 100 %ige CO_2-Einsparung vollständig konterkarieren. Dies gilt auch für Biogas und Power-to-Gas (PtG). • THG-Vermeidungskosten von PtG-betriebenen LNG-Nfz liegen auch bei komplett eliminierten Methanverlusten deutlich über den elektrifizierten Optionen. Betriebswirtschaftlich liegen deren Kosten über den Kosten der Diesel-Nfz.[22] • Auch bei der Verbrennung erneuerbarer Gase entstehen Luftschadstoffe (zum Beispiel Stickstoffoxide), die eine Abgasnachbehandlung erforderlich machen. • Auch bei kurz- und mittelfristiger Nutzung besteht die Gefahr, dass der Auf- und Ausbau von Gas-Tank-Infrastrukturen zu langfristigen Pfadabhängigkeiten (Lock-in-Effekte) führt, die dem Ziel der Klimaneutralität entgegenstehen.

Tabelle 3: Argumente für und gegen den Einsatz gasförmiger Kraftstoffe im Nfz-Bereich
(Quelle: Eigene Darstellung)

19 vgl. ICCT (2020): “little to no climate benefit”.

20 IPCC (2015)

21 Der Faktor 28–30 drückt das THG-Potenzial bezogen auf den Zeitraum von 100 Jahren aus. Bei kürzeren Betrachtungszeiträumen fällt der Faktor höher aus.

22 UBA (2019b)

OPTIMIERUNG VON TRAILERN UND LKW-AUSSTATTUNGSKOMPONENTEN

- Um Emissionsminderungen in der Bestandsflotte zu erreichen, stellt die Optimierung von Trailern und Lkw-Ausstattungskomponenten bereits kurzfristig wirksame Lösungselemente dar. Folgende Ansatzpunkte können positiv auf die Effizienz wirken und zur CO_2-Vermeidung beitragen:
  - **Neujustierung von zulässigen Maßen und Gewichten von Lkw** (unter Berücksichtigung von Infrastruktur, Verkehrssicherheit und Wettbewerb der Verkehrsträger).
  - **Digital vernetzte Fahrzeuge und Trailer**: Systemoffene Telematik-Plattformen für umfassend digital vernetzte Fahrzeuge- und Fahrzeugkombinationen bieten ein großes Potenzial, um die Effizienz und Sicherheit im Transport zu steigern.
  - **Elektrische Achsen**: Intelligente elektrische Antriebssysteme auch in Trailerachsen können einen signifikanten Beitrag zu klimaverträglichen Transporten leisten. Sie eignen sich sowohl für die Umrüstung bestehender Fahrzeuge als auch für Neufahrzeuge. Beispielsweise wird an rekuperierenden Trailerachsen zur Energierückgewinnung gearbeitet, die allerdings einer gesetzlichen Anpassung bedürften, da Zusatzantriebe im Trailer bisher untersagt sind.
  - **Aerodynamiksysteme**: Heckklappen können die Aerodynamik eines Lastzugs erheblich verbessern und zu einer Reduzierung des CO_2-Ausstoßes beitragen. Da Heckklappen aufgrund europäischer Vorschriften einklappbar sein müssen, beeinträchtigen sie auch nicht die KV-Fähigkeiten von Trailern. Heckflügelsysteme mit intelligenter, digitaler Steuerung ermöglichen zudem ein automatisiertes Öffnen und Schließen aerodynamischer Anbauten (zum Beispiel geschwindigkeits- und umgebungsabhängig) und können den Komfort für die Fahrerin beziehungsweise den Fahrer erhöhen.
  - **Digitale und vernetzte Lösungen für Reifen** ermöglichen die optimale Kontrolle von Reifendruck und Reifentemperatur und können so CO_2 sparen und die Sicherheit erhöhen. Auch die Nutzung von Leichtlaufreifen hilft, Verbrauch und CO_2 zu reduzieren.
  - **Angleichung der technisch möglichen Höchstgeschwindigkeit (Speed Limiter) an die erlaubte Höchstgeschwindigkeit**: In Deutschland ist für Lkw > 7,5 t zGG eine maximale Autobahngeschwindigkeit von 80 Kilometern pro Stunde (km/h) erlaubt. Der Speed Limiter ist in der Regel aufgrund europarechtlicher Vorgaben auf 89 km/h vorprogrammiert und könnte heute in kleinen Schritten in der Werkstatt nach unten parametriert werden. Für Flotten besteht mit einer Parametrierung auf eine Speed-Limiter-Geschwindigkeit zwischen 82 bis 89 km/h ein erhebliches Kraftstoff-Einsparpotenzial bei relativ geringen Minderungen der Durchschnittsgeschwindigkeit. Diese Maßnahme bedarf allerdings einer gesamteuropäischen Regelung, um Wettbewerbsverzerrungen auszuschließen.

FÖRDERUNG VON VERLAGERUNG UND KOMBINIERTEM VERKEHR (KV)

- Auf den Verkehrsträgern Schiene und Wasserstraße können heute Güter in der Regel mit geringeren CO_2-Emissionen pro Tonnenkilometer als auf der Straße transportiert werden. Beim weitgehend elektrisch betriebenen Schienengüterverkehr kommt der bereits heute hohe Einsatz erneuerbarer Energieträger hinzu. Eine Erhöhung der Anteile des Schienenverkehrs und der Binnenschifffahrt am Güterverkehr kann somit ebenso einen signifikanten Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten wie die Elektrifizierung der Antriebe im Straßengüterverkehr.
- Zur Stärkung des KV ist nicht nur eine bessere Verzahnung von Straße und Schiene notwendig, sondern auch ein Aufschließen an moderne Logistikanforderungen.
- Um die Verlagerung von Straßentransporten auf die Schiene anzureizen, benötigen Straßengüterverkehrsunternehmen schienenfähiges Equipment und Eisenbahnverkehrsunternehmen innovativere Ladungs- und Waggon-

konzepte. Um dies zu unterstützen, wäre zum Beispiel ein eigenständiges Anreizprogramm zur Anschaffung KV-fähiger Sattelauflieger notwendig.

- Mit Blick auf einen möglichen Fahrplan zur Erreichung der Ziele des KSPr 2030 ist anzumerken: Der **Ausbau der Tank- und Ladeinfrastruktur** für BEV- und H_2-BZ-Lkw sowie ein erweitertes Testnetz (bis Ende 2023) und der Aufbau des möglichen Oberleitungs-Kernnetzes für OH-Lkw (ab circa 2025) sollten **unter Einbeziehung von Häfen, der Standorte des KV** sowie ausgewiesener Güterverkehrszentren beschleunigt werden.
- An dieser Stelle sei auf die laufenden Diskussionen im Handlungsfeld „Schienenverkehr“ verwiesen, die ebenfalls in die Gesamtbetrachtung der AG 1 im kommenden Jahr einfließen werden.
- Insbesondere durch digitale Tools und veränderte Logistikprozesse könnten durch verbesserte Routenplanungen höhere Auslastungsraten und eine Vermeidung von Teillast- und Leerfahrten erreicht und so bei gleicher Transportleistung CO_2 eingespart werden. An dieser Stelle ist ein enger Austausch mit der AG 3 notwendig, um das Thema zukünftig näher zu beleuchten.

4. ZUSAMMENFASSENDE GESAMTBETRACHTUNG UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

In diesem Werkstattbericht hat die AG 1 relevante Fakten zusammengetragen und mithilfe der wissenschaftlichen Begleitung eigene Berechnungen durchgeführt, um die Frage zu beantworten, **mit welchen Technologiepfaden und operativen Schritten insbesondere schwere Nutzfahrzeuge ihren Beitrag zum Erreichen der Zielsetzung des KSPr 2030 leisten können**.

- Der Wechsel zu CO_2-freien Antrieben im **Nfz-Bereich ist ein zentraler Hebel, um die Klimaschutzziele im Verkehrssektor** erreichen zu können. Im KSPr 2030 wurde das Ziel formuliert, dass ein Drittel der Fahrleistung im schweren Straßengüterverkehr bis 2030 elektrisch oder unter Verwendung strombasierter Kraftstoffe erbracht werden soll. Der vorliegende Werkstattbericht hat hierzu – basierend auf den von der Bundesregierung im Rahmen des KSPr 2030 beauftragten Gutachten des Öko-Instituts und von Prognos – die drei Technologiepfade batterieelektrischer Antrieb, H_2-Brennstoffzellentechnologie und Oberleitungs-Hybrid, deren Marktfähigkeit und die dafür notwendigen politischen Instrumente analysiert.
- Dabei ist festzuhalten, dass dieser Werkstattbericht die aktuellen Ergebnisse nur eines Handlungsfelds abbildet und die **notwendige integrierende Gesamtschau aller Handlungsfelder** (Antriebswechsel Pkw, Antriebswechsel Nutzfahrzeuge, Alternative Kraftstoffe, Schienenverkehr und Urbane Mobilität) durch die AG 1 im kommenden Jahr 2021 vorgenommen wird.
  - Die Gesamtkostenschau sollte neben den in diesem Werkstattbericht betrachteten volkswirtschaftlichen und betriebswirtschaftlichen Wirkungen der Instrumente auch Fragen der fiskalischen Auswirkungen der Instrumente aufgreifen.
  - Ferner gilt es, weitere Ansätze der inkrementellen Fahrzeugoptimierung zu betrachten.
- Da das Handlungsfeld „Alternative Kraftstoffe“ in einem gesonderten Werkstattbericht behandelt wird, fokussiert sich der vorliegende Werkstattbericht auf die Elektrifizierung des Antriebsstrangs bei Nfz.

AUSGANGSSITUATION

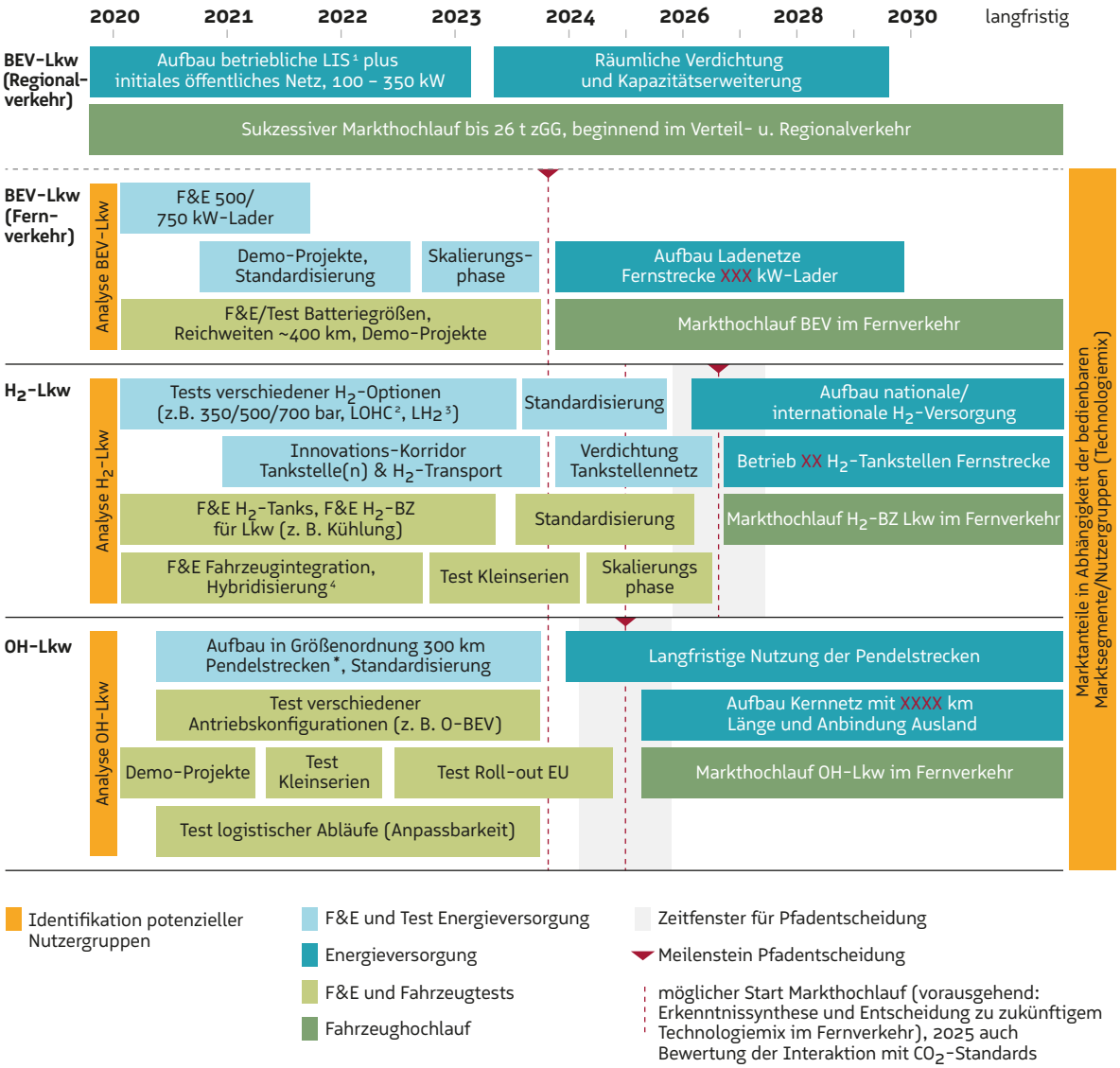
- Die Auswertung der Gutachten des Öko-Instituts und von Prognos hat gezeigt, dass **unter den geltenden Rahmenbedingungen (Stand Januar 2020) und bei dem damaligen Umsetzungsstand von Maßnahmen die angestrebten CO_2-Minderungsziele im KSPr 2030 von 17 bis 18 Mio. t CO_2-Äquivalenten nicht erreicht werden**. Dies ist maßgeblich auf folgende Gründe zurückzuführen:
  - Sowohl **nachfrage- als auch angebotsseitig gibt es Hürden**.
  - Der Nfz-Bereich ist gekennzeichnet durch eine **große Heterogenität** von Fahrzeugtypen und Einsatzzwecken.
  - Während für LNF batterieelektrische Konzepte bereits marktreif sind, sind bei SNF insbesondere zum Einsatz im Fernverkehr (> 26 t zGG) **mehrere Technologieoptionen der Elektrifizierung teilweise noch in der Erprobungsphase**.
  - Gerade die Klassen der SNF verursachen unter anderem aufgrund der hohen Fahrleistung im Fernverkehr **über die Hälfte der CO_2-Emissionen**, obwohl sie nur circa 10 % der Fahrzeuge im Bestand ausmachen.

- Die Transport- und Logistikbranche unterliegt einem großen **internationalen Wettbewerbsdruck** und ist bei der Auswahl neuer Technologien stark – aber nicht nur – TCO-getrieben.
- Auch andere **systemische Kriterien** wie global umspannende Logistikketten, die Nutzung des KV und Routenflexibilität gilt es zu berücksichtigen.

- So werden im SNF-Bereich derzeit **mehrere Technologiepfade der Elektrifizierung** parallel verfolgt, die unterschiedliche Reifegrade aufweisen. Jedoch zeigt sich eine **Grundproblematik**:
  - Auf der einen Seite ist das Verfolgen paralleler Technologiepfade **mit erhöhten Investitionskosten und Unsicherheiten** sowohl für Anbietende als auch für die Nutzenden und die öffentliche Hand verbunden, sodass **angesichts knapper finanzieller Ressourcen in einem anspruchsvollen wirtschaftlichen Umfeld** der Wunsch nach einer Technologiefokussierung besteht.
  - Auf der anderen Seite besteht die Gefahr, dass durch ein **zu frühes Abrücken vom Grundsatz der Technologieoffenheit** durch ein mögliches Lock-in das Klimaziel verfehlt wird. So muss stets das Risiko einer höheren wirtschaftlichen Belastung gegenüber dem **Risiko der Nicht-Erreichung des Klimaschutzziels** abgewogen werden. Auch kann eine **frühzeitige Technologieentscheidung langfristig gesehen zu höheren Kosten führen**, die gegenüber den Anforderungen in der Logistikbranche und im **Interesse einer optimalen Einsatzfähigkeit** der Nutzfahrzeuge abgewogen werden müssen.

WEGE ZU EINEM DRITTEL ELEKTRISCHER FAHRLEISTUNG BEI SCHWEREN NUTZFAHRZEUGEN

- Zur strukturierten Analyse der zur Verfügung stehenden Technologieoptionen – BEV-, H_2-BZ- und OH-Lkw – wurde **ein möglicher Fahrplan** entwickelt, der die drei Technologiepfade, deren Marktreife und infrastrukturelle Rahmenbedingungen darstellt. Er dient:
  - **zur Visualisierung notwendiger operativer Schritte,**
  - **der Identifikation möglicher Entscheidungsfenster für eine etwaige Technologiefokussierung und**
  - **zur Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Beschleunigung von Maßnahmen.**
- Dieser mögliche Fahrplan zeigt:
  - Der sukzessive Hochlauf der **BEV-Lkw im Regionalverkehr** (bis 26 t zGG) beginnt ab 2020, vor allem im Verteilverkehr. Bis circa 2023 stehen der Aufbau betrieblicher Ladeinfrastrukturen (LIS) (100 kW) und das öffentliche Netz (350 kW) im Fokus. Ab circa 2024 sollte es eine räumliche Verdichtung und Kapazitätserweiterung der LIS geben.
  - **BEV-Lkw im Fernverkehr** (> 26 t zGG) befinden sich bis circa Ende 2023 fahrzeugseitig im F&E- und Demo-Stadium, im Bereich Ladeinfrastruktur sollte die erste Phase zum Aufbau einer ersten flächendeckenden Ladeinfrastruktur auf Basis der bestehenden Standards genutzt werden. Ab circa 2024 erfolgt der Ausbau von öffentlichen, flächendeckenden, auf SNF ausgelegten Schnellladenetzen sowie der Markthochlauf der Fahrzeuge.
  - **OH-Lkw** befinden sich bis circa Ende 2023 sowohl fahrzeugseitig als auch im Bereich Ladeinfrastruktur im F&E- und Demo-Stadium (Elektrifizierung von Pendelstrecken), bei zeitgleichem Ausbau eines erweiterten Testnetzes von circa 300 km. Ab circa 2024 folgt eine längerfristige Nutzung der Pendelstrecken. Ab circa 2025 könnte der Aufbau des Oberleitungs-Kernnetzes und der Markthochlauf der Fahrzeuge erfolgen.
  - Die F&E-Phase ist bei **H_2-BZ-Lkw** sowohl fahrzeugseitig als auch im Bereich Tankinfrastruktur bis circa 2026 vorgesehen. Anschließend wird es auch hier zum Aufbau einer nationalen und internationalen H_2-Versorgung, dem Betrieb eines Tankstellennetzes im Fernverkehr und dem Markhochlauf von H_2-BZ-Lkw kommen. Eine offene Frage betrifft das physikalisch-chemische Vorliegen des H_2: gasförmig unter Hochdruck, tiefkalt verflüssigt oder organisch-chemisch gebunden in Form einer Flüssigkeit (Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC)).



1 LIS = Ladeinfrastruktur
2 LOHC = Liquid Organic Hydrogen Carrier
3 LH_2 = Liquid Hydrogen
4 H_2-ICE werden auch getestet, sind hier aber nicht aufgeführt, da kein elektrifizierter Antriebsstrang eingesetzt wird.
* Wird nicht von allen Mitgliedern der AG befürwortet.

Abbildung 11: Darstellung verschiedener Technologieoptionen und notwendiger Schritte zum Markthochlauf: Ein möglicher Fahrplan zur Erreichung der Ziele des KSPr 2030
(Quelle: Eigene Darstellung)

KERNERGEBNISSE UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

- Die in diesem Werkstattbericht aufgeführten Ergebnisse von Berechnungen der jeweiligen TCO- und CO_2-Vermeidungskosten-Betrachtung und weiterer Entscheidungsparameter (grenzüberschreitende Kompatibilität, Existenz von Ladeinfrastruktur im In- und Ausland) haben gezeigt, **dass zum jetzigen Zeitpunkt keine Fokussierung auf einen einzigen Technologiepfad empfohlen werden kann. Jedoch kann eine Technologiefokussierung mittelfristig sinnvoll sein, um die technische Machbarkeit und eine Reduktion des gesamten Investitionsvolumens zu erwirken**.
    - Die vorgenommenen Abschätzungen und Berechnungen haben ergeben, dass das Verfolgen nur eines Technologiepfads nicht ausreichend ist, um das Klimaziel 2030 erreichen zu können.
    - Nur bei einem **Technologiemix** (zum Beispiel aus BEV-Lkw und/oder H_2-BZ-Lkw und/oder OH-Lkw) liegen die notwendigen Hochlaufkurven (Stückzahlen) der jeweiligen Technologien in einer derzeit als technologisch machbar geltenden Größenordnung vor.
- In Bezug auf die **TCO- und CO_2-Vermeidungskosten-Betrachtungen** ist festzuhalten, dass diese durch **staatliche Instrumente signifikant beeinflussbar** sind.
    - Die Vermeidungskosten werden maßgeblich durch die drei Faktoren **Fahrzeugpreis, Energieinfrastrukturkosten und Energiekosten** bestimmt. Diese drei Faktoren fallen je nach Technologie (BEV-, H_2-BZ- oder OH-Lkw) unterschiedlich ins Gewicht.
    - BEV- und OH-Lkw weisen unter den aktuellen Prämissen (siehe Anhang) und unter Anwendung der Technologieneutralität die geringsten Vermeidungs- und Nutzerkosten auf.

Daher werden für alle drei Technologiepfade verschiedene **Handlungsempfehlungen** getroffen:

- **Die Förderung der Anschaffungskosten elektrisch betriebener Nfz** ist essenziell für den Markthochlauf. Dies ist bereits im KSPr 2030 angelegt, muss beschleunigt und nach 2023 befristet fortgeführt werden.
- Der **Ausbau der Tank- und Ladeinfrastruktur** für BEV- und H_2-BZ-Lkw sowie der Ausbau der Oberleitungsinfrastruktur für OH-Lkw mit verschiedenen Antriebskonfigurationen (zum Beispiel Diesel-Hybrid, BEV-Hybrid, LNG-Hybrid, BZ-Hybrid, Batteriegrößen) ist ebenso bereits im KSP 2030 angelegt, muss beschleunigt und synchron zum Markthochlauf angegangen werden. Hierbei ist von zentraler Bedeutung, dass beim Ausbau Normungs- und Standardisierungsaktivitäten mit verfolgt werden.
- Für gesicherte Erkenntnisse über einen möglichen Markthochlauf der **OH-Lkw** sind geförderte **Praxistests in größeren Maßstäben** notwendig (Pendelstrecken), um über einen weiteren Ausbau eines Kernnetzes entscheiden zu können.
- Es braucht eine **Intensivierung von Forschung & Entwicklung zur Förderung der notwendigen technologischen Reife** von **H_2-BZ-Lkw** sowie für deren Skalierungsfähigkeit (insbesondere H_2-Kraftstoff, H_2-Kühlung) und zur Kostendegression (Innovationskorridore).
- **Die Klärung offener Fragen der Normung und Standardisierung muss beschleunigt werden.**
    - Eine internationale Standardisierung bezüglich Ladestecker wird derzeit erarbeitet. Mit einem Standard ist bis 2023 zu rechnen. Auch für technische Betriebsparameter von OH-Lkw ist eine schnelle Normung und Standardisierung notwendig.
    - Eine Normung für Druckwasserstoff ist derzeit in Arbeit, für flüssigen Wasserstoff ist diese noch unklar.
    - An dieser Stelle ist eine enge Verzahnung mit den Arbeiten der Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM), insbesondere mit den Arbeitsgruppen 5 und 6, notwendig.
- **Mit der Einführung einer CO_2-Komponente bei der Lkw-Maut und der Beeinflussung von Abgaben und Umlagen (EEG-Umlage, Steuern, CO_2-Preis etc.) stehen zwei starke regulatorische Hebel zu Verfügung.** Dabei ist wichtig:

  - Der aktuelle Prozess zur Revision der Eurovignetten-Richtlinie muss genutzt werden, um die Maut als wettbewerbsneutrales Instrument für den Markthochlauf elektrifizierter Nfz verwenden zu können.
  - Für die Wettbewerbsneutralität ist ein Austarieren des Brennstoffemissionshandelsgesetzes (BEHG) und der daraus resultierenden Wettbewerbsnachteile von deutschen gegenüber nicht-deutschen Transportdienstleistern erforderlich, wobei die Gesamtbelastung der Nutzenden berücksichtigt werden muss. Hierfür ist eine Befassung durch das Bundesministerium der Finanzen anzuraten.
- Ferner können sich folgende **weitere wichtige Instrumente** positiv auf das Erreichen des KSPr 2030-Ziels auswirken, die nicht nur Neufahrzeuge, sondern auch den Fahrzeugbestand adressieren. Die genauen Ausgestaltungen sind zukünftig weiter zu diskutieren. Dabei sind Wechselwirkungen zu beachten.
  - Neujustierung von zulässigen Maßen und Gewichten von Lkw (unter Berücksichtigung von Infrastruktur, Verkehrssicherheit und Wettbewerb der Verkehrsträger),
  - Förderung der Optimierung von Lkw-Ausstattungskomponenten und Trailern (wie zum Beispiel digital vernetzte Fahrzeuge und Trailer, elektrische Achsen, Aerodynamiksysteme),
  - Förderung des KV sowie der KV-Fähigkeit von Trailern,
  - Angleichung der technisch möglichen Höchstgeschwindigkeit (Speed Limiter) an die erlaubte Höchstgeschwindigkeit (europäische Lösung erforderlich zur Vermeidung von Wettbewerbsverzerrungen) und
  - Kompensation von Nutzlastverlusten durch Mehrgewicht alternativer Antriebe.
- Trotz der vielfältigen Handlungsempfehlungen **ist ein Höchstmaß an Geschwindigkeit und Konsequenz gefragt**, um eine oder mehrere Technologieoptionen für Mitte der 2020er Jahre **technisch, organisatorisch, sozialverträglich und wirtschaftlich** marktfähig zu machen. Dies ist eine notwendige Voraussetzung, um in der zweiten Hälfte des Jahrzehnts alternative Antriebe im Nfz-Bereich zügig zu skalieren und eine Marktintegration zu erzielen.
- Dabei ist von wesentlicher Bedeutung, eine **Skalierung der Technologieoptionen im europäischen Maßstab** zu erreichen.
- Das handlungsfeldübergreifende Thema der Defossilisierung der Bestandsfahrzeuge durch alternative Kraftstoffe wird im Werkstattbericht „Klimawirkungen und Wege zum Einsatz alternativer Kraftstoffe" betrachtet.
- Im Jahr 2023 sollte eine Erkenntnissynthese aus der Technologie-Entwicklungsphase aller drei Technologien vorgenommen werden.

ANHANG

ABSCHÄTZUNGEN UND BERECHNUNGEN ZU BENÖTIGTEN TECHNOLOGIEOPTIONEN ZUR ERREICHUNG DES KLIMASCHUTZZIELS 2030

Die Zielmarke von einem Drittel elektrifizierter SNF in 2030 lässt sich theoretisch erreichen durch einen Hochlauf einer Kombination alternativer SNF oder durch einen Hochlauf der Einzeltechnologien.

- Die folgende Tabelle zeigt exemplarische Hochläufe, die (1) die Zeitpunkte des potenziellen Markthochlaufs der Technologien laut Fahrplan berücksichtigen, (2) das Ausscheiden älterer SNF aus der Flotte einbeziehen, (3) das Ziel von rund einem Drittel elektrifizierter Fahrleistung erreichen unter der Annahme, dass die Technologien die gleichen Fahrleistungen aufweisen und (4) unter Berücksichtigung das OH-Lkw nur einen Teil ihrer Fahrleistung elektrifiziert erbringen.
- Der kombinierte Markthochlauf aller drei Technologien führt (1) zu realisierbaren Zulassungszahlen für jede Technologie in der Größenordnung von maximal 14.500 Einheit in einem Jahr, (2) zu einem moderierten Rückgang der Diesel- und LNG-Zulassungen und (3) zu einem verbleibenden Anteil an fossil basierten Zulassungen in 2030 von 30 %. Das heißt, der Übergang von fossilen zu elektrifizierten Antrieben bei SNF erfolgt mit einem gemäßigten Tempo und nicht abrupt.
- Die Analyse eines Hochlaufs ausschließlich von BEV ergibt durch die frühe Verfügbarkeit von BEV ab 2024 ebenfalls einen eher moderaten Transformationspfad mit einer moderierten Abkehr vom Diesel und verbleibenden fossilen Anteilen von ungefähr der Hälfte.
- Ein fokussierter Hochlauf nur von H_2-BZ führt aufgrund der im Vergleich späten Markteinführung von H_2-BZ-SNF zur Notwendigkeit eines sehr schnellen Umbruchs und abrupter Abkehr von Diesel und LNG, die in 2030 nur noch 15 % Marktanteil besitzen würden und sehr hohen jährlichen Neuzulassungen von H_2-BZ-SNF von bis zu 48.000 Einheiten.
- Ein auf OH-SNF fokussierter Hochlauf kann früher beginnen als für H_2-BZ-SNF, dafür wird ein größerer Bestand an OH-SNF benötigt, um ein Drittel elektrifizierte Fahrleistung zu erbringen, da ein Teil der Fahrleistung eines OH-SNF noch mit Diesel erbracht wird. Daher müssen die OH-SNF bis 2030 ebenfalls die meisten Diesel- und LNG-SNF verdrängen (Rest-Marktanteil 17 %), um die geforderte elektrische Fahrleistung zu erbringen. Die maximale jährliche Zulassung läge auch hier sehr hoch bei 47.000 Einheiten.
- Ergänzend zu den konstant gehaltenen Parametern in der Vermeidungskostenrechnung (siehe Kasten im Kapitel 2, Seite 21) werden weitere Parameter benötigt, die sich im Zeitverlauf des Markthochlaufs verändern. Dies ist ein weiterer großer Unterschied zwischen Vermeidungskosten (VMK) und TCO: Erstere benötigen einen Zeitverlauf, um die Investitionshochläufe korrekt abzubilden, während letztere nur Daten für das Betrachtungsjahr 2030 erfordern.

- Die folgenden Tabellen listen die zeitabhängigen Parameter auf. Die Parameter wurden der Literatur oder eigenen Analysen von M-Five sowie der Institute für Verkehrsplanung und Logistik (VPL) und für Umwelttechnik und Energiewirtschaft (IUE) der Technischen Universität Hamburg (TUHH) entnommen und mit den beteiligten NPM-Mitgliedern abgestimmt. Die Parameter der Referenz bilden ein konservatives Mengengerüst.

Anteil elektrifizierte Fahrleistung 2030	Technologien im Hochlauf [Anzahl Neuzulassungen (NZL) pro Jahr]	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
33%	BEV-Lkw	20	40	70	80	1.500	5.500	10.500	12.670	13.100	13.100	13.100
	H_2-BZ-Lkw	2	10	20	20	40	50	60	2.500	5.500	8.500	12.000
	OH-Lkw	20	40	120	180	80	1.900	5.200	9.500	13.500	14.500	14.500
	Anteil Diesel & LNG verbleibend ab 2025 in %						86%	71%	55%	42%	36%	30%
33%	nur BEV Hochlauf	42	110	240	320	1,950	8.760	17.520	23.500	26.000	27.000	27.500
	Anteil Diesel & LNG verbleibend ab 2025 in %						84%	68%	57%	53%	52%	51%
30%	nur H_2-BZ Hochlauf	2	10	20	20	50	200	1.000	9.000	32.000	48.000	48.000
	Anteil Diesel & LNG verbleibend ab 2025 in %						100%	98%	84%	42%	14%	15%
30%	nur OH-Lkw Hochlauf	20	40	140	200	100	3.000	13.000	34.500	44.000	47.000	47.000
	Anteil Diesel & LNG verbleibend ab 2025 in %						94%	76%	37%	21%	16%	17%
	Gesamte NZL > 20 t	51.500	52.000	52.500	53.000	53.500	54.000	54.500	55.000	55.500	56.000	56.500

Tabelle 4: Anzahl Neuzulassungen und Diesel- und LNG-Anteil im Markthochlauf gemäß Fahrplan und für die VMK
(Quelle: M-Five, Eigene Berechnungen)

FAHRZEUGPREISE FÜR DIE VMK UND TCO IN DER REFERENZ

	€2020/Fzg.	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Diesel	Nfz > 20 t zGG bis SZ	90.000	90.210	90.420	90.630	90.840	91.050	91.260	91.470	91.680	91.890	92.100
	SZ 40 t zGG	100.000	100.280	100.560	100.840	101.120	101.400	101.680	101.960	102.240	102.520	102.800
BEV-Lkw	Nfz > 20 t zGG bis SZ	540.000	450.000	360.000	270.000	180.000	180.000	180.000	180.000	180.000	180.000	180.000
	SZ 40 t zGG	660.000	550.000	440.000	330.000	220.000	220.000	220.000	220.000	220.000	220.000	220.000
H_2-BZ-Lkw	Nfz > 20 t zGG bis SZ	660.000	597.143	534.286	471.429	408.571	345.714	282.857	220.000	220.000	220.000	220.000
	SZ 40 t zGG	720.000	651.429	582.857	514.286	445.714	377.143	308.571	240.000	240.000	240.000	240.000
OH-Lkw	Nfz > 20 t zGG bis SZ	420.000	364.000	308.000	252.000	196.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000	140.000
	SZ 40 t zGG	450.000	390.000	330.000	270.000	210.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000	150.000

Tabelle 5: Fahrzeugpreise für die VMK und TCO in der Referenz
(Quelle: M-Five, TUHH-VPL, Abstimmung mit NPM-Mitgliedern)

WARTUNGSKOSTEN FÜR DIE VMK UND TCO

	€2020/Fzg.	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Diesel-Lkw	Nfz > 20 t zGG bis SZ	10.400	10.400	10.500	10.500	10.600	10.700	10.700	10.800	10.800	10.900	10.900
	SZ 40 t zGG	16.600	16.700	16.800	16.900	17.000	17.000	17.100	17.200	17.300	17.400	17.500
BEV-Lkw	Nfz > 20 t zGG bis SZ	8.600	8.500	8.500	8.400	8.400	8.300	8.300	8.300	8.200	8.200	8.200
	SZ 40 t zGG	14.600	14.500	14.500	14.400	14.300	14.200	14.100	14.100	14.100	14.000	14.000
H_2-BZ-Lkw	Nfz > 20 t zGG bis SZ	8.900	8.800	8.700	8.600	8.500	8.400	8.400	8.300	8.300	8.300	8.300
	SZ 40 t zGG	17.900	17.700	17.500	17.300	17.100	16.900	16.800	16.800	16.700	16.600	16.600
OH-Lkw	Nfz > 20 t zGG bis SZ	10.800	10.800	10.800	10.800	10.800	10.800	10.800	11.000	11.000	11.200	11.200
	SZ 40 t zGG	17.400	17.400	17.400	17.400	17.400	17.400	17.400	17.600	17.600	18.000	18.000

Tabelle 6: Wartungskosten für die VMK und TCO
(Quelle: M-Five, TUHH-VPL, Abstimmung mit NPM-Mitgliedern)

INFRASTRUKTURKOSTEN FÜR DIE INVESTITIONEN DER VMK

Infra-struktur	Typ	Einheit	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Lade-station	50 kW	€$_{2020}$/Lade-säule	42.300	41.900	41.500	41.100	40.700	40.300	39.900	39.500	39.100	38.700	38.300
	150 kW	€$_{2020}$/Lade-säule	80.000	79.100	78.200	77.300	76.400	75.400	74.500	73.600	72.700	71.800	70.800
	350 kW	€$_{2020}$/Lade-säule	225.000	223.000	220.000	215.000	210.000	205.000	200.000	195.000	190.000	185.000	180.000
	750 kW	€$_{2020}$/Lade-säule	420.000	408.000	396.000	384.000	372.000	360.000	348.000	336.000	324.000	312.000	300.000
H_2-Tank-stelle		Mio. €$_{2020}$/ Tankstelle	7.26	7.26	7.26	7.26	7.26	7.26	7.26	7.26	7.26	7.26	7.26
Ober-leitung		Mio. €$_{2020}$/km beidseitig	3	3	2.5	2.5	2.5	2.5	2.2	2.2	2.2	2	2

Tabelle 7: Infrastrukturkosten für die Investitionen der VMK
(Quelle: M-Five, TUHH-VPL, Abstimmung mit NPM-Mitgliedern)

STROMPREISE FÜR DIREKTE STROMNUTZUNG UND ELEKTROLYSE IN DER REFERENZ – ENTNAHME HOCHSPANNUNG

€$_{2020}$/kWh	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Beschaffung	4,0	4,1	4,2	4,4	4,5	4,6	4,8	4,9	5,0	5,2	5,4
Netzentgelt und Umlagen	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
EEG-Umlage	6,8	6,4	5,8	7,6	7,4	7,1	6,7	6,1	5,7	5,3	4,7
Stromsteuer	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3
Strompreis (ohne Umsatzsteuer (USt.))	**14,3**	**14,0**	**13,6**	**15,4**	**15,3**	**15,1**	**14,9**	**14,3**	**14,0**	**13,8**	**13,3**
Aufschlag bei Nutzung Mittelspannung	1,7	1,7	1,7	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5

Tabelle 8: Strompreise für direkte Stromnutzung und Elektrolyse in der Referenz
(Quelle: M-Five, TUHH-VPL, Abstimmung mit NPM-Mitgliedern)

WASSERSTOFFPREIS IN DER REFERENZ UND SENSITIVITÄT

€2020/kg H2	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Referenz inkl. Stromsteuer (TCO)	10,6	10,3	10,0	10,7	10,5	10,3	10,0	9,6	9,3	9,0	8,7
Referenz ohne Stromsteuer (VMK)	9,9	9,6	9,3	10,0	9,9	9,6	9,3	8,9	8,7	8,4	8,1
Import (TCO Sensitivität)	4,44	4,46	4,46	4,48	4,49	4,50	4,51	4,52	4,54	4,56	4,57

Tabelle 9: Wasserstoffpreis in der Referenz und Sensitivität
(Quelle: M-Five, TUHH-VPL, Abstimmung mit NPM-Mitgliedern)

ELEKTRISCHER FAHRANTEIL VON OH-LKW IN DER REFERENZ

In %	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Anteil an Jahresfahrleistung	50	51	52	53	53	55	57	59	61	63	65

Tabelle 10: Anschaffungspreise der Fahrzeuge nach Technologie im Referenzszenario
(Quelle: M-Five, TUHH-VPL, Abstimmung mit NPM-Mitgliedern)

BERECHNUNGSGRUNDLAGEN ZUR TCO-BETRACHTUNG

Detaillierte Darstellung der Eingangsgrößen für die TCO-Betrachtung im Referenzszenario:

- **Die Höhe des Fahrzeugpreises ist ein wichtiger Faktor** für die Nutzerinnen und Nutzer als Einmalinvestition am Anfang der Nutzungsdauer oder als monatliche Leasingrate mit Rückgabeoption des Fahrzeugs nach einer definierten Nutzungsdauer. Im Folgenden wird als Anschaffungspreis der Fahrzeugpreis abzüglich des **Zuschusses auf Investitionsmehrkosten** und einer Steuerersparnis durch eine **Sonder-Abschreibung** (Sonder-AfA) von 50 % im ersten Jahr verwendet. In dem aktuellen Förderprogramm „Energieeffiziente und/oder CO_2-arme schwere Nutzfahrzeuge“ (EEN) ist bis Ende 2020 ein Zuschuss auf Investitionsmehrkosten (Zuschuss darf 40 % der Investitionsmehrkosten nicht überschreiten) von bis zu 40.000 € festgelegt. Die Höhe des Zuschusses ist abhängig von der Antriebsart des Fahrzeugs. Bezuschusst werden die Investitionsmehrkosten, die erforderlich sind, um anstelle eines Lkw oder eines Sattelzugs mit Dieselantrieb und der Schadstoffklasse Euro VI einen vergleichbaren Lkw mit einem alternativen Antrieb einzusetzen. Basierend auf einem Vorschlag zur Instrumentenausgestaltung wird dieser Zuschuss im Referenzszenario auf 80 % der Investitionsmehrkosten im Vergleich zum Referenz-Diesel-Lkw angehoben.

23 Beim OH-Lkw ist keine Sonder-AfA möglich, da dieser hier als Diesel-Hybrid-Lkw angenommen wird. Es gilt aber: „Elektronutzfahrzeuge sind Fahrzeuge der EG-Fahrzeugklassen N1, N2 und N3, die ausschließlich durch Elektromotoren angetrieben werden, die ganz oder überwiegend aus mechanischen oder elektrochemischen Energiespeichern oder aus emissionsfrei betriebenen Energiewandlern gespeist werden.“ (§ 7c Einkommensteuergesetz (EStG))

- Unter der Annahme von Fahrzeugpreisen von 220.000 € für eine BEV-SZ 40 t und 102.800 € für einen vergleichbaren Euro VI Diesel-SZ 40 t ergibt dies einen Zuschuss von 93.760 € für die Investitionsmehrkosten.
- Die Steuerersparnis durch die Sonder-AfA[23] von 50 % für BEV- und H_2-BZ-Lkw im ersten Jahr wird auf den Fahrzeugpreis abzüglich des Zuschusses auf Investitionsmehrkosten berechnet. Dadurch ergibt sich beispielsweise bei einer BEV-SZ mit einem Fahrzeugpreis von 220.000 € abzüglich eines Zuschusses von 80 % der Investitionsmehrkosten von 93.760 € ein Anschaffungspreis von 126.240 €. Von diesem Anschaffungspreis werden 50 % Sonder-AfA berechnet und mit 15 % Kapitalertrags- und 3,5 % Gewerbesteuer multipliziert, um die Steuerersparnis zu berechnen. Diese beträgt dann bei BEV-SZ 40 t 11.677 € im ersten Jahr. Die Anschaffungspreise der Fahrzeuge im Referenzszenario sind in Tabelle 11 dargestellt.

Nfz > 12 t bis < = 20 t zGG	**H_2-BZ-Lkw 2030**	**OH-Lkw 2030**	**BEV-Lkw 2030**	**Diesel-Lkw 2030**
Fahrzeugpreis [€]	190.000	120.000	150.000	73.000
Zuschuss auf Investitionsmehrkosten [€]	-93.600	-37.600	-61.600	0
Steuerersparnis durch Sonder-AfA [€]	-8.917	0	-8.177	0
Anschaffungspreis [€]	**87.483**	**82.400**	**80.223**	**73.000**
Preisunterschied zu Diesel [%]	20%	13%	10%	
Nfz > 20 t zGG bis SZ	**H_2-BZ-Lkw 2030**	**OH-Lkw 2030**	**BEV-Lkw 2030**	**Diesel-Lkw 2030**
Fahrzeugpreis [€]	220.000	140.000	180.000	92.100
Zuschuss auf Investitionsmehrkosten [€]	-102.320	-38.320	-70.320	0
Steuerersparnis durch Sonder-AfA [€]	-10.885	0	-10.145	0
Anschaffungspreis [€]	**106.795**	**101.680**	**99.535**	**92.100**
Preisunterschied zu Diesel [%]	16%	10%	8%	
SZ 40 t zGG	**H_2-BZ-Lkw 2030**	**OH-Lkw 2030**	**BEV-Lkw 2030**	**Diesel-Lkw 2030**
Fahrzeugpreis [€]	240.000	150.000	220.000	102.800
Zuschuss auf Investitionsmehrkosten [€]	-109.760	-37.760	-93.760	0
Steuerersparnis durch Sonder-AfA [€]	-12.047	0	-11.677	0
Anschaffungspreis [€]	**118.193**	**112.240**	**114.563**	**102.800**
Preisunterschied zu Diesel [%]	15%	9%	11%	

Tabelle 11: Anschaffungspreise der Fahrzeuge nach Technologie im Referenzszenario
(Quelle: M-Five und TUHH-VPL mit Input von NPM-Mitgliedern)

- Um die jährliche Annuität der Fahrzeuge zu ermitteln, werden die Anschaffungspreise über die Nutzungsdauer (10 Jahre für die Fahrzeuggrößenklasse Nfz > 12t bis < = 20t zGG und Nfz > 20t bis SZ; 6 Jahre für SZ) mit einem Diskontzinssatz von 2 % als jährliche Annuität umgerechnet.
- Die Versicherungskosten belaufen sich auf 1,5 %/Jahr vom Fahrzeugpreis (ohne Zuschüsse) je nach Größenklasse und Antriebsart. Bei der Kfz-Steuer wurde der aktuell geltende Kfz-Steuerbetrag im Jahr 2020 für Dieselfahrzeuge > 12t zGG von nominal 556 € in den realen Preis von 449 $€_{2020}$ im Jahr 2030 umgerechnet. Für die alternativen Antriebe wurde weiterhin eine Kfz-Steuerbefreiung im Jahr 2030 angenommen.
- Für die realen Energiekosten (Referenzpreis inklusive EEG-Umlage und ohne Energiesteuer und Stromsteuer) wurde ein Dieselpreis von 61,73 ct_{2020}/l, ein Strompreis von 12,01 ct_{2020}/kWh (Hochspannungsnetz) und ein Wasserstoffpreis von 8,71 $€_{2020}$/kg H_2 verwendet. Bei der realen Energiesteuer und Stromsteuer (ohne MwSt.) wurde zwischen der Energiesteuer von 40,53 ct_{2020}/l und der Stromsteuer von 1,32 ct_{2020}/kWh unterschieden. Für den Endverbraucherpreis von H_2 wurde keine zusätzliche Energiebesteuerung vorgenommen (bei der Herstellung ist die Stromsteuer enthalten). Für Diesel-Lkw und OH-Lkw wurde zusätzlich zu den Energiekosten ein AdBlue®-Verbrauch von 0,008 $€_{2020}$/km angenommen. Beim OH-Lkw wird dieser nur bei den 35 % konventionellen Fahranteils verbraucht.
- Bei den Wartungs- und Reparaturkosten wurden individuelle Werte für die Fahrzeuggewichtsklassen und Antriebsarten verwendet. Bei den Kosten für Ausfalltage wurde eine Pauschale von 1.000 € und zwei Ausfalltage pro Jahr angenommen.
- Als zentrales Steuerinstrument wurde die CO_2-gespreizte Maut als mögliche Mautgestaltungsvariante als Kombination aus einem Infrastrukturkostensatz und einem CO_2-gespreizten Zuschlag berechnet.
- Die Infrastrukturkomponente in Abhängigkeit von Achsen und zulässigem Gesamtgewicht wurde nach dem Wegekostengutachten, das zwischen den Jahren 2018 und 2022 gilt, bestimmt. Aufgrund des bereits ausgeschriebenen Gutachtens zur Wegekostenrechnung (WKR) 1930/StV10, „Wegekosten und externe Kosten des Bundesfernstraßennetzes im Zeitraum 2023 bis 2027“, wurde die Infrastrukturkomponente weiterhin als nominaler Wert von 11,5 ct/km für Nfz > 12 bis ≤ 20t zGG und von 17,4 ct/km für Nfz > 20 und SZ mit mehr als vier Achsen verwendet. Dahinter steht die Annahme einer Anpassung unter Berücksichtigung der Inflation im anstehenden Wegekostengutachten. Für die alternativen Antriebe wurde im Referenzszenario ein Mautabschlag der Infrastrukturkomponente von 75 % angenommen.
- Die Höhe des CO_2-gespreizten Zuschlags setzt sich aus einer Umweltkomponente zusammen, bestehend aus: (1) einem Zuschlag durch einen CO_2-Preis, (2) einem Zuschlag für Luftverschmutzung von 1,1 ct/km nur für Diesel-Lkw (Euro VI; bei niedrigeren Euro-Klassen gilt ein höherer Zuschlag) und (3) einem pauschalen Zuschlag für Lärmbelästigung von 0,2 ct/km für alle Antriebe.
- Im Referenzszenario wurde ein CO_2-Preis von 100 €/t CO_2 verwendet, der für das Jahr 2030 einem realen Preis von 86 $€_{2020}$/t CO_2 entspricht. Um den Mautkostensatz für den Diesel-Lkw zu bestimmen, wurde der CO_2-Preis mit dem Kraftstoffverbrauch (22 bis 27 l/km je nach Fahrzeuggewichtsklasse) und dem Tank-to-Wheel(TtW)-Emissionsfaktor für Diesel-Kraftstoff multipliziert (2,63 kg CO_2/l nach Update of Emission Factors for HBEFA Version 4.1).
- Für die jährlichen Mautkosten wurde ein Mautstreckenfahranteil von 90 % für Nfz > 12 bis ≤ 20t zGG und Nfz >20 t bis < 40 t zGG und von 95 % für Sattelzüge = 40 t zGG angenommen.

LITERATURVERZEICHNIS

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2020): Klimaschutz in Zahlen 2020.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (2019): 53 Klimamaßnahmen. Neuigkeitenzimmer BMVI vom 28.06.2019.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2019): Effizienzstrategie 2050. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffiezienzstrategie-2050.html [Aufgerufen: 09.11.2020]

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) (2020): Die Nationale Wasserstoffstrategie. URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/die-nationale-wasserstoffstrategie.html [Aufgerufen: 09.11.2020]

Bundesregierung: Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (BEHG). URL: http://www.gesetze-im-internet.de/behg/ [Aufgerufen: 09.11.2020]

Bundesregierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. URL: https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1 [Aufgerufen: 09.11.2020]

Fraunhofer ISI (2018): Alternative Antriebe und Kraftstoffe im Straßengüterverkehr. Handlungsempfehlungen für Deutschland. URL: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Thesen-Zukunft-StrGueterverkehr.pdf [Aufgerufen: 09.11.2020]

Intraplan Consult (2020): Gleitende Mittelfristprognose für den Güter- und Personenverkehr. Mittelfristprognose Winter 2019/20 (im Auftrag des BMVI). URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/gleitende-kurz-und-mittelfristprognose.html [Aufgerufen: 09.11.2020]

Intergouvernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2015): Climate Change 2014 Synthesis Report. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf [Aufgerufen: 09.11.2020]

International Council on Clean Transportation (ICCT) (2020): LNG trucks: A bridge to nowhere. URL: https://theicct.org/blog/staff/lng-trucks-bridge-nowhere [Aufgerufen: 09.11.2020]

Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) / Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (Hrsg.) (2019): Verkehr in Zahlen 2019/2020 und ältere Ausgaben. URL: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehr-in-zahlen.html [Aufgerufen: 09.11.2020]

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität, Arbeitsgruppe 1 (NPM AG 1) (2019): Zwischenbericht 03/2019 – Wege zur Erreichung der Klimaziele 2030 im Verkehrssektor. URL: https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de/wp-content/uploads/2020/03/NPM-AG-1-Wege-zur-Erreichung-der-Klimaziele-2030-im-Verkehrssektor.pdf [Aufgerufen: 09.11.2020]

Öffentliche Ausschreibungen: 1930/StV10 - Wegekosten und externe Kosten des Bundesfernstraßennetzes im Zeitraum 2023 bis 2027 Referenznummer der Bekanntmachung: 1930/StV10. URL: https://ausschreibungen-deutschland.de/589851_1930StV10_-_Wegekosten_und_externe_Kosten_des_Bundesfernstrassennetzes_im_Zeitraum_2023_bis_2019_Berlin [Aufgerufen: 09.11.2020]

Prognos/ Fraunhofer ISI/ GWS/ iinas (2020): Energiewirtschaftliche Projektionen und Folgeabschätzungen 2030/2050 (im Auftrag des BMWi). URL: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Wirtschaft/klimagutachten.html [Aufgerufen: 09.11.2020]

Schade W., Perez E., Berthold D., Wagner U., Krail M., Waßmuth V. (2018): Gestaltung des neuen Referenzszenarios zur Nutzung in der MKS 2017+. Arbeitspapier im Auftrag des BMVI.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (2020): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen 2019. Bruttoinlandsprodukt, Bruttonationaleinkommen, Volkseinkommen Lange Reihen ab 1925. URL: https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Tabellen/inlandsprodukt-volkseinkommen1925-pdf.pdf?_blob=publicationFile&v=5 [Aufgerufen: 09.11.2020]

Statistisches Bundesamt (Destatis) / Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) (2020): Indikatoren zur Dialogfassung der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie. URL: https://dns-dialogfassung.github.io/ [Aufgerufen: 09.11.2020]

The Boston Consulting Group/ Prognos (2018): Klimapfade für Deutschland (im Auftrag des BDI). URL: https://www.prognos.com/publikationen/alle-publikationen/777/show/ea23a619d1825ff7e985a8a2c03c8845/ [Aufgerufen: 09.11.2020]

Umweltbundesamt (UBA) (2019a): Nationaler Inventarbericht zum deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2018. URL: https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envxh8awg [Aufgerufen: 09.11.2020]

Umweltbundesamt (UBA) (2019b): Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050. URL: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sensitivitaeten-zur-bewertung-der-kosten [Aufgerufen: 09.11.2020]

Umweltbundesamt (UBA) (2019c): Trendtabelle Sektoren und vorläufige THG-Daten 2019. URL: https://www.umweltbundesamt.de/dokument/trendtabelle-sektoren-vorlaeufige-thg-daten-2019 [Aufgerufen: 09.11.2020]

Umweltbundesamt (UBA) (2020): Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung. Teilbericht des Projektes „THG-Projektion: Weiterentwicklung der Methoden und Umsetzung der EU-Effort Sharing Decision im Projektionsbericht 2019 („Politikszenarien IX“)“ (erstellt durch Öko-Institut, Fraunhofer ISI, IREES und Thünen-Institut im Auftrag von BMU und UBA). URL: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/abschaetzung-der-treibhausgasminderungswirkung-des [Aufgerufen: 09.11.2020]

Umweltbundesamt (UBA) / Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) (2020): „Treibhausgasemissionen gingen 2019 um 6,3 Prozent zurück“ (Gemeinsame Pressemitteilung vom 16.03.2020). URL: https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-gingen-2019-um-63-prozent [Aufgerufen: 09.11.2020]

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	Entwicklung der Treibhausgasemissionen im nationalen Güterverkehr	S. 9
Abbildung 2	CO_2-Emissionen und Fahrleistung inländischer Lkw im Straßengüterverkehr 1990–2019	S. 10
Abbildung 3	Bestand, Fahrleistung und CO_2-Emissionen von Nutzfahrzeugen in Deutschland im Jahr 2016 nach zulässigem Gesamtgewicht	S. 11
Abbildung 4	Darstellung verschiedener Technologieoptionen und notwendiger Schritte zum Markthochlauf: Ein möglicher Fahrplan zur Erreichung der Ziele des KSPr 2030	S. 19
Abbildung 5	CO_2-Vermeidungskosten alternativer Nfz > 20 t	S. 20
Abbildung 6	Komponenten der Vermeidungskosten Nfz > 20 t zGG	S. 21
Abbildung 7	TCO 2030 ohne staatliche Steuerungsinstrumente	S. 23
Abbildung 8	TCO 2030 ohne staatliche Steuerungsinstrumente mit sinkenden Fahrzeugpreisen	S. 24
Abbildung 9	Referenzszenario mit staatlichen Steuerungsinstrumenten	S. 26
Abbildung 10	Berechnung der Sensitivitäten bei unterschiedlichen Mautvarianten, H_2-Preisen und Investitionskostenzuschüssen	S. 28
Abbildung 11	Darstellung verschiedener Technologieoptionen und notwendiger Schritte zum Markthochlauf: Ein möglicher Fahrplan zur Erreichung der Ziele des KSPr 2030	S. 36

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1	Kategorisierung der im Klimaschutzprogramm 2030 (KSPr 2030) genannten Maßnahmen	S. 13
Tabelle 2	Vergleichende Gegenüberstellung Öko-Institut/Prognos: Bewertung der Instrumente	S. 15
Tabelle 3	Argumente für und gegen den Einsatz gasförmiger Kraftstoffe im Nfz-Bereich	S. 31
Tabelle 4	Anzahl Neuzulassungen und Diesel- und LNG-Anteil im Markthochlauf gemäß Fahrplan und für die VMK	S. 40 (Anhang)
Tabelle 5	Fahrzeugpreise für die VMK und TCO in der Referenz	S. 41 (Anhang)
Tabelle 6	Wartungskosten für die VMK und TCO	S. 41 (Anhang)
Tabelle 7	Infrastrukturkosten für die Investitionen der VMK	S. 42 (Anhang)
Tabelle 8	Strompreise für direkte Stromnutzung und Elektrolyse in der Referenz – Entnahme Hochspannung	S. 42 (Anhang)
Tabelle 9	Wasserstoffpreis in der Referenz	S. 43 (Anhang)
Tabelle 10	Elektrischer Fahranteil von OH-Lkw in der Referenz	S. 43 (Anhang)
Tabelle 11	Anschaffungspreise der Fahrzeuge nach Technologie im Referenzszenario	S. 44 (Anhang)

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AfA	Absetzung für Abnutzung
AG	Arbeitsgruppe
BAB	Bundesautobahn
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BEV-Lkw	Lkw mit batterieelektrischem Antrieb (BEV: Battery Electric Vehicle)
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BZ	Brennstoffzelle
CCS	Combined Charging System
CH_4	Methan
CNG	Compressed Natural Gas
CO_2	Kohlenstoffdioxid
ct	Eurocent
Destatis	Statistisches Bundesamt
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEN	Förderprogramm „Energieeffiziente und/oder CO_2-arme schwere Nutzfahrzeuge“ des Bundesamts für Güterverkehr
EStG	Einkommensteuergesetz
EU	Europäische Union
F&E	Forschung und Entwicklung
Fzg.	Fahrzeug
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung
H_2	Wasserstoff
H_2-BZ-Lkw	Lkw mit Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb
ICE-Lkw	Lkw mit Verbrennungsmotor (ICE: Internal Combustion Engine)
IUE	Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft der Technischen Universität Hamburg
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
Kfz	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
km	Kilometer

km/h	Kilometer pro Stunde
KSPr 2030	Klimaschutzprogramm 2030
KV	Kombinierter Verkehr
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
LH_2	Liquid Hydrogen
LIS	Ladeinfrastruktur
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LNG	Liquefied Natural Gas
LOHC	Liquid Organic Hydrogen Carriers
Mio.	Million
Mrd.	Milliarde
MwSt.	Mehrwertsteuer
Nfz	Nutzfahrzeug
NPM	Nationale Plattform Zukunft der Mobilität
OH-Lkw	Lkw mit Oberleitungs-Hybrid-Antrieb
Pkw	Personenkraftwagen
PtG	Power-to-Gas
SNF	Schweres Nutzfahrzeug
SZ	Sattelzug
t	Tonne
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgasemissionen
TtW	Tank-to-Wheel
TUHH	Technische Universität Hamburg
UBA	Umweltbundesamt
USt.	Umsatzsteuer
VMK	Vermeidungskosten
VPL	Institut für Verkehrsplanung und Logistik der Technischen Universität Hamburg
WKR	Wegekostenrechnung
ZE	Zero Emission
zGG	zulässiges Gesamtgewicht

MITGLIEDER AD-HOC-GRUPPE ANTRIEBSWECHSEL NUTZFAHRZEUGE

- **Agora Verkehrswende:** Dr. Carl-Friedrich Elmer
- **Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI):** Jürgen Hasler
- **Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW):** Philipp Riedel
- **Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL):** Jens Pawlowski – Leitung der Ad-hoc-Gruppe Antriebswechsel Nutzfahrzeuge
- **e-mobil BW – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg:** Franz Loogen – Leitung der Arbeitsgruppe 1
- **Naturschutzbund Deutschland (NABU):** Daniel Rieger
- **Verband der Automobilindustrie (VDA):** Dr. Michael Niedenthal

GUTACHTERINNEN UND GUTACHTER UND EXTERNE EXPERTINNEN UND EXPERTEN

- **M-Five:** Dr. Wolfgang Schade
- **Öko-Institut:** Dr. Katharina Göckeler
- **Öko-Institut:** Moritz Mottschall
- **Öko-Institut:** Dr. Wiebke Zimmer
- **Technische Universität Hamburg (TUHH):** Patrick Fieltsch
- **Technische Universität Hamburg (TUHH):** Prof. Dr.-Ing. Heike Flämig

REDAKTION

- **acatech:** Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Simona Wieser
- **e-mobil BW:** Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg, Stephan Braun
- **e-mobil BW:** Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg, Isabell Knüttgen
- **ifok:** Lea Dabbert

IMPRESSUM

Verfasser
Nationale Plattform Zukunft der Mobilität,
Arbeitsgruppe 1 „Klimaschutz im Verkehr“,

Berlin, Dezember 2020

Herausgeber
Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Redaktionelle Unterstützung
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V.
e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue Mobilitätslösungen und Automotive Baden-Württemberg
ifok GmbH

Satz und Gestaltung
ifok GmbH

Lektorat
Nikola Klein e-squid text konzept lektorat

Die Nationale Plattform Zukunft der Mobilität (NPM) ist per Kabinettsbeschluss von der Bundesregierung eingesetzt und wird vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur federführend koordiniert.

Sie arbeitet unabhängig, überparteilich und neutral. Alle Berichte spiegeln ausschließlich die Meinungen der in der NPM beteiligten Expertinnen und Experten wider.

NPM

Nationale Plattform Zukunft der Mobilität