Forschungsbericht 2026-32

Klimafreundliche Nutzfahrzeugkonzepte: Integrierte Modellierung und Simulation der Marktdiffusion von Elektrifizierungs- und Automatisierungstechnologien

Özcan Deniz

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Fahrzeugkonzepte
Stuttgart

Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt

Forschungsbericht 2026-32

Klimafreundliche Nutzfahrzeugkonzepte: Integrierte Modellierung und Simulation der Marktdiffusion von Elektrifizierungs- und Automatisierungstechnologien

Özcan Deniz

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Fahrzeugkonzepte
Stuttgart

203 Seiten
55 Bilder
48 Tabellen
308 Literaturstellen

Deutsches Zentrum
DLR für Luft- und Raumfahrt



Herausgeber:

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e. V.
Wissenschaftliche Information
Linder Höhe
D-51147 Köln

ISSN 1434-8454
ISRN DLR-FB-2026-32
Erscheinungsjahr 2026
DOI: 10.57676/hc8p-2j98

D 93 (Dissertation der Universität Stuttgart)

Erklärung des Herausgebers:
Als Manuskript gedruckt.
Abdruck oder sonstige Verwendung nur nach Absprache mit dem DLR gestattet

Nutzfahrzeugmarkt, Diffusionsmodell, agentenbasierte Simulation, techno-ökonomische Bewertung, hybride und elektrische Antriebsstrangkonzepte, erneuerbare Kraftstoffe, Fahrzeugautomatisierungskonzepte

Özcan DENIZ
DLR, Institut für Fahrzeugkonzepte, Standort

Klimafreundliche Nutzfahrzeugkonzepte: Integrierte Modellierung und Simulation der Marktdiffusion von Elektrifizierungs- und Automatisierungstechnologien
Universität Stuttgart (Dissertation)

Die Transformation des Straßengüterverkehrs hin zur Klimaneutralität stellt trotz erheblicher Effizienzsteigerungen bei konventionellen Nutzfahrzeugen weiterhin eine zentrale Herausforderung dar. Zwar konnten die spezifischen CO_2-Emissionen von Lastkraftwagen durch inkrementelle technologische Fortschritte signifikant reduziert werden, gleichzeitig ist jedoch aufgrund steigender Transportleistungen und eines weiterhin dominierenden dieselmotorischen Fahrzeugbestands ein Anstieg der absoluten Emissionen zu verzeichnen. Vor dem Hintergrund ambitionierter klimapolitischer Zielsetzungen, insbesondere der angestrebten Klimaneutralität in Deutschland bis 2045, gewinnen alternative Energieträger, neue Antriebskonzepte sowie Automatisierungstechnologien zunehmend an Bedeutung. Bisherige Forschungsarbeiten betrachten diese technologischen Entwicklungen jedoch überwiegend isoliert und vernachlässigen deren wechselseitige Abhängigkeiten sowie die Rolle von Marktakteuren und deren Kaufentscheidungen. Insbesondere fehlt es an integrierten Modellansätzen, die die Marktdiffusion alternativer Energieträger und Antriebskonzepte in Verbindung mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden im Straßengüterverkehr systematisch abbilden.

Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Arbeit das Ziel, die Marktdurchdringung von Elektrifizierungs- und Automatisierungstechnologien im deutschen Nutzfahrzeugmarkt szenariobasiert zu untersuchen und daraus Handlungspfade für eine Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs bis 2050 abzuleiten. Hierzu wird ein integriertes Fahrzeugmarkt-Simulationsmodell entwickelt, das eine agentenbasierte Simulation des Neufahrzeugmarktes mit einem dynamischen Bestandsflottenmodell koppelt. Auf diese Weise können sowohl individuelle Kaufentscheidungen der Marktakteure als auch makroökonomische Effekte auf Flottenstruktur, Energieverbrauch und Emissionen konsistent analysiert werden. Die Arbeit adressiert dabei zentrale Forschungsfragen zur Entwicklung der Marktanteile unterschiedlicher Antriebsstrang- und Automatisierungskonfigurationen, zu den Integrationspotenzialen alternativer Kraftstoffe sowie zu den Auswirkungen verschiedener Technologieszenarien auf den Endenergieverbrauch des Straßengüterverkehrs.

Methodisch basiert die Untersuchung auf einer empirischen Auswertung der Marktstrukturen und der Fahrleistungszusammensetzung im deutschen Straßengüterverkehr. Aufbauend auf einer systematischen Parametrisierung konventioneller und alternativer Energieträger, Antriebssysteme und Automatisierungstechnologien entsprechend dem Stand der Technik werden Nutzfahrzeugkonzepte ausgelegt und hinsichtlich ihrer technischen Einsatzfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und ökologischen Wirkung bewertet. Diese mehrdimensionale Bewertungsmethodik wird in ein agentenbasiertes Neufahrzeugmarktmodell integriert, das die Kaufentscheidungen von Flottenbetreibern unter Berücksichtigung technischer, ökonomischer und regulatorischer Rahmenbedingungen abbildet. Zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung des Fahrzeugbestands wird das Marktmodell mit einem Stock-and-Flow-Modell gekoppelt, das die Flottenentwicklung sowie die damit verbundenen Energieverbräuche und CO_2-Emissionen über den Betrachtungszeitraum hinweg simuliert. Die Anwendung des Gesamtmodells erfolgt exemplarisch für den deutschen Straßengüterverkehr mithilfe der DLR-Simulationssoftware VECTOR21 in einem Referenzszenario sowie zwei alternativen Technologieszenarien bis zum Jahr 2050.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich im Szenario der direkten Elektrifizierung eine zeitlich gestaffelte Diffusion batterieelektrischer Nutzfahrzeuge ergibt. Der Markthochlauf setzt zunächst im Segment der leichten Nutzfahrzeuge ein und dehnt sich bei entsprechendem Ausbau der Ladeinfrastruktur sowie fortbestehenden ökonomischen Anreizen schrittweise auf mittlere und schwere Fahrzeugklassen aus. Hybrid- und gasbasierte Antriebe spielen unter diesen Rahmenbedingungen nur eine untergeordnete Rolle. Demgegenüber verdeutlicht das Szenario der indirekten Elektrifizierung, dass strombasierte Kraftstoffe lediglich ein begrenztes, auf spezifische Anwendungsfälle beschränktes Dekarbonisierungspotenzial besitzen. Zwar können sie unter regulatorischen Annahmen kurzfristig zur Emissionsminderung beitragen, insbesondere in Segmenten mit hohen Fahrleistungsanforderungen, jedoch weisen sie aufgrund hoher Umwandlungsverluste deutlich höhere Well-to-Wheel-Energieverbräuche auf als direkte elektrische Antriebe. Ihr Einsatz erscheint daher langfristig nur dort sinnvoll, wo eine vollständige Elektrifizierung technisch oder infrastrukturell nicht realisierbar ist.

Wasserstoffbasierte Antriebskonzepte gewinnen insbesondere im schweren Fernverkehr an Bedeutung und konkurrieren dort mit batterieelektrischen Systemen um Marktanteile. Die Simulationen zeigen, dass sich bei entsprechendem Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur und der Verfügbarkeit kostengünstigen grünen Wasserstoffs ab Mitte der 2030er Jahre relevante Marktanteile erzielen lassen. Darüber hinaus verdeutlicht das Automatisierungsszenario, dass der Hochlauf automatisierter Nutzfahrzeuge komplementär zur Elektrifizierung verläuft und beide Transformationspfade sich gegenseitig verstärken. Insbesondere im Fernverkehr führen höhere Automatisierungsgrade zu betrieblichen Effizienzgewinnen, die trotz eines zusätzlichen energiebedingten Aufwands durch die Automatisierungskomponenten zu einer Reduktion der Fahrzeugnutzungskosten und des spezifischen Endenergieverbrauchs beitragen können.

Insgesamt zeigt die Szenarioanalyse, dass eine direkte Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs aus energetischer Sicht die effizienteste Dekarbonisierungsstrategie darstellt, während strombasierte Kraftstoffe lediglich eine ergänzende Rolle einnehmen können. Automatisierung wirkt dabei als Verstärker gesamtenergetischer Effizienzgewinne, insbesondere in Kombination mit elektrischen Antrieben.

Die Arbeit leistet einen wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag durch die Entwicklung eines integrierten, technologieübergreifenden Fahrzeugmarktmodells, das erstmals die Kopplung von Antriebs-, Energie- und Automatisierungstechnologien mit agentenspezifischen Entscheidungsprozessen ermöglicht. Darüber hinaus liefert sie praxisrelevante Erkenntnisse für Fahrzeughersteller, Energieversorger, Politik und Flottenbetreiber hinsichtlich der zeitlichen Ausgestaltung technologischer Strategien, des Infrastrukturbedarfs sowie geeigneter regulatorischer Rahmenbedingungen.

Aufbauend auf den entwickelten Modellen ergeben sich vielfältige Ansatzpunkte für zukünftige Forschung, insbesondere hinsichtlich einer stärkeren Differenzierung von Einsatzprofilen, einer vertieften Abbildung von Infrastruktur und Automatisierungseffekten sowie einer Erweiterung des Modellrahmens auf europäische Märkte und gekoppelte Energiesystemanalysen.

Commercial Vehicles Market, Diffusion Model, Agent Based Simulation, techno-economical assessment, synthetic fuels, alternative powertrain concepts, vehicle automation concepts

(Published in German)

Özcan DENIZ
German Aerospace Center (DLR), Institute of Vehicle Concepts, Stuttgart

Climate-friendly commercial vehicle concepts: Integrated modelling and simulation of market diffusion of electrification and automation technologies

University of Stuttgart (PhD thesis)

The transformation of road freight transport towards climate neutrality remains a major challenge despite significant efficiency improvements in conventional commercial vehicles. While incremental technological advances have led to a substantial reduction in the specific CO_2 emissions of trucks, absolute emissions have continued to increase due to rising transport demand and a vehicle fleet still dominated by diesel-powered vehicles. Against the backdrop of ambitious climate policy targets, particularly the objective of achieving climate neutrality in Germany by 2045, alternative energy carriers, new powertrain concepts, and automation technologies are gaining increasing importance. However, existing research predominantly addresses these technological developments in isolation and largely neglects their interdependencies as well as the role of market actors and their vehicle purchase decisions. In particular, there is a lack of integrated modeling approaches that systematically capture the market diffusion of alternative energy carriers and powertrain concepts in combination with different levels of vehicle automation in road freight transport.

Against this background, the objective of this dissertation is to analyze the market penetration of electrification and automation technologies in the German commercial vehicle market using a scenario-based approach and to derive potential pathways for the decarbonization of road freight transport up to 2050. To this end, an integrated vehicle market simulation model is developed, combining an agent-based new vehicle market simulation with a dynamic vehicle stock model. This approach enables a consistent analysis of both individual purchase decisions by market actors and macroeconomical effects on vehicle fleet structure, energy consumption, and CO2 emissions. The work addresses key research questions concerning the development of market shares of powertrain- and automation-specific vehicle configurations, the integration potentials of alternative fuels, and the impacts of different technology scenarios on the final energy demand of road freight transport.

Methodologically, the analysis is based on an empirical assessment of market structures and mileage distributions in German road freight transport. Building on a systematic parameterization of conventional and alternative energy carriers, powertrain systems, and automation technologies in accordance with the state of the art, commercial vehicle concepts are designed and evaluated with respect to their technical feasibility, economic performance, and environmental impacts. This multidimensional evaluation framework is integrated into an agent-based new vehicle market model that represents fleet operators' purchase decisions under technological, economic, and regulatory constraints. To capture the temporal evolution of the vehicle fleet, the market model is coupled with a stock-and-flow model that simulates fleet development as well as the associated energy consumption and CO_2 emissions over time. The integrated modeling framework is applied to the German road freight transport system using the DLR simulation software VECTOR21 and is evaluated for a reference scenario and two alternative technology scenarios with a time horizon extending to 2050.

The results indicate that, under a direct electrification scenario, the diffusion of battery-electric commercial vehicles follows a temporally staggered pattern. Market uptake initially occurs in the segment of light commercial vehicles and gradually expands to medium and heavy-duty vehicles, provided that charging infrastructure is expanded accordingly and economic incentives are maintained. Under these conditions, hybrid and gas-based powertrain concepts play only a minor role. In contrast, the indirect electrification scenario demonstrates that electricity-based fuels offer only a limited and application-specific decarbonization potential. Although such fuels may contribute to emission reductions in the short term under certain regulatory assumptions, particularly in segments with high mileage requirements, they exhibit significantly higher well-to-wheel energy consumption due to substantial conversion losses. Consequently, their long-term use appears reasonable only in applications where full electrification is technically or infrastructurally infeasible.

Hydrogen-based powertrain concepts gain relevance primarily in long-haul heavy-duty transport, where they compete with battery-electric systems and synthetic fuels for market shares. Simulation results show that, given sufficient infrastructure deployment and the availability of cost-competitive green hydrogen, noticeable market penetration can be achieved from the mid-2030s onward. Furthermore, the automation scenario reveals that the uptake of automated commercial vehicles develops in a complementary manner to electrification, with both transformation pathways mutually reinforcing each other. In particular, higher levels of automation in long-haul freight transport lead to operational efficiency gains that can outweigh the additional energy demand associated with automation components, resulting in lower vehicle operating costs and a reduction in specific final energy consumption.

Overall, the scenario analysis demonstrates that direct electrification represents the most energy-efficient decarbonization pathway for road freight transport, while electricity-based fuels are limited to a complementary role. Automation acts as an amplifier of overall energy efficiency gains, especially when combined with electric powertrains.

This dissertation makes a significant scientific contribution by developing an integrated, cross-technology vehicle market model that, for the first time, links powertrain, energy, and automation technologies with agent-specific decision-making processes. In addition, the results provide practical insights for vehicle manufacturers, energy suppliers, policymakers, and fleet operators regarding the temporal design of technology strategies, infrastructure requirements, and appropriate regulatory frameworks.

Building on the developed modeling framework, several avenues for future research emerge, including a more detailed differentiation of vehicle usage profiles, an enhanced representation of infrastructure availability and automation effects, and an extension of the model to the European commercial vehicle market combined with energy system modeling.

Klimafreundliche Nutzfahrzeugkonzepte: Integrierte Modellierung und Simulation der Marktdiffusion von Elektrifizierungs- und Automatisierungstechnologien

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Özcan Deniz, M. Sc.
aus Ludwigshafen am Rhein, Deutschland

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Tjark Siefkes
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Kreimeyer
Tag der mündlichen Prüfung:	13.10.2026

Institut für Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart

Angefertigt am Institut für Fahrzeugkonzepte
des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) Stuttgart

2026

D93 (Dissertation Universität Stuttgart)

Zusammenfassung

Die Transformation des Straßengüterverkehrs hin zur Klimaneutralität stellt trotz erheblicher Effizienzsteigerungen bei konventionellen Nutzfahrzeugen weiterhin eine zentrale Herausforderung dar. Zwar konnten die spezifischen CO_2-Emissionen von Lastkraftwagen durch inkrementelle technologische Fortschritte signifikant reduziert werden, gleichzeitig ist jedoch aufgrund steigender Transportleistungen und eines weiterhin dominierenden dieselmotorischen Fahrzeugbestands ein Anstieg der absoluten Emissionen zu verzeichnen. Vor dem Hintergrund ambitionierter klimapolitischer Zielsetzungen, insbesondere der angestrebten Klimaneutralität in Deutschland bis 2045, gewinnen alternative Energieträger, neue Antriebskonzepte sowie Automatisierungstechnologien zunehmend an Bedeutung. Bisherige Forschungsarbeiten betrachten diese technologischen Entwicklungen jedoch überwiegend isoliert und vernachlässigen deren wechselseitige Abhängigkeiten sowie die Rolle von Marktakteuren und deren Kaufentscheidungen. Insbesondere fehlt es an integrierten Modellansätzen, die die Marktdiffusion alternativer Energieträger und Antriebskonzepte in Verbindung mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden im Straßengüterverkehr systematisch abbilden.

Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Arbeit das Ziel, die Marktdurchdringung von Elektrifizierungs- und Automatisierungstechnologien im deutschen Nutzfahrzeugmarkt szenariobasiert zu untersuchen und daraus Handlungspfade für eine Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs bis 2050 abzuleiten. Hierzu wird ein integriertes Fahrzeugmarkt-Simulationsmodell entwickelt, das eine agentenbasierte Simulation des Neufahrzeugmarktes mit einem dynamischen Bestandsflottenmodell koppelt. Auf diese Weise können sowohl individuelle Kaufentscheidungen der Marktakteure als auch makroökonomische Effekte auf Flottenstruktur, Energieverbrauch und Emissionen konsistent analysiert werden. Die Arbeit adressiert dabei zentrale Forschungsfragen zur Entwicklung der Marktanteile unterschiedlicher Antriebsstrang- und Automatisierungskonfigurationen, zu den Integrationspotenzialen alternativer Kraftstoffe sowie zu den Auswirkungen verschiedener Technologieszenarien auf den Endenergieverbrauch des Straßengüterverkehrs.

Methodisch basiert die Untersuchung auf einer empirischen Auswertung der Marktstrukturen und der Fahrleistungszusammensetzung im deutschen Straßengüterverkehr. Aufbauend auf einer systematischen Parametrisierung konventioneller und alternativer Energieträger, Antriebssysteme und Automatisierungstechnologien entsprechend dem Stand der Technik werden Nutzfahrzeugkonzepte ausgelegt und hinsichtlich ihrer technischen Einsatzfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und ökologischen Wirkung bewertet. Diese mehrdimensionale Bewertungsmethodik wird in ein agentenbasiertes Neufahrzeugmarktmodell integriert, das die Kaufentscheidungen von Flottenbetreibern unter Berücksichtigung

technischer, ökonomischer und regulatorischer Rahmenbedingungen abbildet. Zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung des Fahrzeugbestands wird das Marktmodell mit einem Stock-and-Flow-Modell gekoppelt, das die Flottenentwicklung sowie die damit verbundenen Energieverbräuche und CO_2-Emissionen über den Betrachtungszeitraum hinweg simuliert. Die Anwendung des Gesamtmodells erfolgt exemplarisch für den deutschen Straßengüterverkehr mithilfe der DLR-Simulationssoftware VECTOR21 in einem Referenzszenario sowie zwei alternativen Technologieszenarien bis zum Jahr 2050.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich im Szenario der direkten Elektrifizierung eine zeitlich gestaffelte Diffusion batterieelektrischer Nutzfahrzeuge ergibt. Der Markthochlauf setzt zunächst im Segment der leichten Nutzfahrzeuge ein und dehnt sich bei entsprechendem Ausbau der Ladeinfrastruktur sowie fortbestehenden ökonomischen Anreizen schrittweise auf mittlere und schwere Fahrzeugklassen aus. Hybrid- und gasbasierte Antriebe spielen unter diesen Rahmenbedingungen nur eine untergeordnete Rolle. Demgegenüber verdeutlicht das Szenario der indirekten Elektrifizierung, dass strombasierte Kraftstoffe lediglich ein begrenztes, auf spezifische Anwendungsfälle beschränktes Dekarbonisierungspotenzial besitzen. Zwar können sie unter regulatorischen Annahmen kurzfristig zur Emissionsminderung beitragen, insbesondere in Segmenten mit hohen Fahrleistungsanforderungen, jedoch weisen sie aufgrund hoher Umwandlungsverluste deutlich höhere Well-to-Wheel-Energieverbräuche auf als direkte elektrische Antriebe. Ihr Einsatz erscheint daher langfristig nur dort sinnvoll, wo eine vollständige Elektrifizierung technisch oder infrastrukturell nicht realisierbar ist.

Wasserstoffbasierte Antriebskonzepte gewinnen insbesondere im schweren Fernverkehr an Bedeutung und konkurrieren dort mit batterieelektrischen Systemen um Marktanteile. Die Simulationen zeigen, dass sich bei entsprechendem Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur und der Verfügbarkeit kostengünstigen grünen Wasserstoffs ab Mitte der 2030er Jahre relevante Marktanteile erzielen lassen. Darüber hinaus verdeutlicht das Automatisierungsszenario, dass der Hochlauf automatisierter Nutzfahrzeuge komplementär zur Elektrifizierung verläuft und beide Transformationspfade sich gegenseitig verstärken. Insbesondere im Fernverkehr führen höhere Automatisierungsgrade zu betrieblichen Effizienzgewinnen, die trotz eines zusätzlichen energiebedingten Aufwands durch die Automatisierungskomponenten zu einer Reduktion der Fahrzeugnutzungskosten und des spezifischen Endenergieverbrauchs beitragen können.

Insgesamt zeigt die Szenarioanalyse, dass eine direkte Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs aus energetischer Sicht die effizienteste Dekarbonisierungsstrategie darstellt, während strombasierte Kraftstoffe lediglich eine ergänzende Rolle einnehmen können. Automatisierung wirkt dabei als Verstärker gesamtenergetischer Effizienzgewinne, insbesondere in Kombination mit elektrischen Antrieben.

Die Arbeit leistet einen wesentlichen wissenschaftlichen Beitrag durch die Entwicklung eines integrierten, technologieübergreifenden Fahrzeugmarktmodells, das erstmals die Kopplung von Antriebs-, Energie- und Automatisierungstechnologien mit agentenspezifischen Entscheidungsprozessen ermöglicht. Darüber hinaus liefert sie praxisrelevante Erkenntnisse für Fahrzeughersteller, Energieversorger, Politik und Flottenbetreiber hinsichtlich der zeitlichen Ausgestaltung technologischer Strategien, des Infrastrukturbedarfs sowie geeigneter regulatorischer Rahmenbedingungen.

Aufbauend auf den entwickelten Modellen ergeben sich vielfältige Ansatzpunkte für zukünftige Forschung, insbesondere hinsichtlich einer stärkeren Differenzierung von Einsatzprofilen, einer vertieften Abbildung von Infrastruktur und Automatisierungseffekten sowie einer Erweiterung des Modellrahmens auf europäische Märkte und gekoppelte Energiesystemanalysen.

Abstract

The transformation of road freight transport towards climate neutrality remains a major challenge despite significant efficiency improvements in conventional commercial vehicles. While incremental technological advances have led to a substantial reduction in the specific CO_2 emissions of trucks, absolute emissions have continued to increase due to rising transport demand and a vehicle fleet still dominated by diesel-powered vehicles. Against the backdrop of ambitious climate policy targets, particularly the objective of achieving climate neutrality in Germany by 2045, alternative energy carriers, new powertrain concepts, and automation technologies are gaining increasing importance. However, existing research predominantly addresses these technological developments in isolation and largely neglects their interdependencies as well as the role of market actors and their vehicle purchase decisions. In particular, there is a lack of integrated modeling approaches that systematically capture the market diffusion of alternative energy carriers and powertrain concepts in combination with different levels of vehicle automation in road freight transport.

Against this background, the objective of this dissertation is to analyze the market penetration of electrification and automation technologies in the German commercial vehicle market using a scenario-based approach and to derive potential pathways for the decarbonization of road freight transport up to 2050. To this end, an integrated vehicle market simulation model is developed, combining an agent-based new vehicle market simulation with a dynamic vehicle stock model. This approach enables a consistent analysis of both individual purchase decisions by market actors and macroeconomical effects on vehicle fleet structure, energy consumption, and CO2 emissions. The work addresses key research questions concerning the development of market shares of powertrain- and automation-specific vehicle configurations, the integration potentials of alternative fuels, and the impacts of different technology scenarios on the final energy demand of road freight transport.

Methodologically, the analysis is based on an empirical assessment of market structures and mileage distributions in German road freight transport. Building on a systematic parameterization of conventional and alternative energy carriers, powertrain systems, and automation technologies in accordance with the state of the art, commercial vehicle concepts are designed and evaluated with respect to their technical feasibility, economic performance, and environmental impacts. This multidimensional evaluation framework is integrated into an agent-based new vehicle market model that represents fleet operators' purchase decisions under technological, economic, and regulatory constraints. To capture the temporal evolution of the vehicle fleet, the market model is coupled with a stock-and-flow model that simulates fleet development as well as the associated energy consumption and CO_2 emissions over time. The integrated modeling framework is applied to the German road freight transport system using the DLR simulation software VECTOR21 and is evaluated for

a reference scenario and two alternative technology scenarios with a time horizon extending to 2050.

The results indicate that, under a direct electrification scenario, the diffusion of battery-electric commercial vehicles follows a temporally staggered pattern. Market uptake initially occurs in the segment of light commercial vehicles and gradually expands to medium and heavy-duty vehicles, provided that charging infrastructure is expanded accordingly and economic incentives are maintained. Under these conditions, hybrid and gas-based powertrain concepts play only a minor role. In contrast, the indirect electrification scenario demonstrates that electricity-based fuels offer only a limited and application-specific decarbonization potential. Although such fuels may contribute to emission reductions in the short term under certain regulatory assumptions, particularly in segments with high mileage requirements, they exhibit significantly higher well-to-wheel energy consumption due to substantial conversion losses. Consequently, their long-term use appears reasonable only in applications where full electrification is technically or infrastructurally infeasible.

Hydrogen-based powertrain concepts gain relevance primarily in long-haul heavy-duty transport, where they compete with battery-electric systems and synthetic fuels for market shares. Simulation results show that, given sufficient infrastructure deployment and the availability of cost-competitive green hydrogen, noticeable market penetration can be achieved from the mid-2030s onward. Furthermore, the automation scenario reveals that the uptake of automated commercial vehicles develops in a complementary manner to electrification, with both transformation pathways mutually reinforcing each other. In particular, higher levels of automation in long-haul freight transport lead to operational efficiency gains that can outweigh the additional energy demand associated with automation components, resulting in lower vehicle operating costs and a reduction in specific final energy consumption.

Overall, the scenario analysis demonstrates that direct electrification represents the most energy-efficient decarbonization pathway for road freight transport, while electricity-based fuels are limited to a complementary role. Automation acts as an amplifier of overall energy efficiency gains, especially when combined with electric powertrains.

This dissertation makes a significant scientific contribution by developing an integrated, cross-technology vehicle market model that, for the first time, links powertrain, energy, and automation technologies with agent-specific decision-making processes. In addition, the results provide practical insights for vehicle manufacturers, energy suppliers, policymakers, and fleet operators regarding the temporal design of technology strategies, infrastructure requirements, and appropriate regulatory frameworks.

Building on the developed modeling framework, several avenues for future research emerge, including a more detailed differentiation of vehicle usage profiles, an enhanced representation of infrastructure availability and automation effects, and an extension of the model to the European commercial vehicle market combined with energy system modeling.

Keywords: Commercial Vehicles Market, Diffusion Model, Agent Based Simulation, techno-economical assessment, synthetic fuels, alternative powertrain concepts, vehicle automation concepts

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis I

Tabellenverzeichnis V

Abkürzungsverzeichnis VIII

Vorwort X

Danksagung XI

1 Einführung 1
1.1 Ausgangssituation 1
1.2 Stand der Forschung 3
1.3 Zielstellung der Arbeit 10
1.4 Aufbau der Arbeit 12

2 Charakterisierung des Straßengüterkraftverkehrs in Deutschland 14
2.1 Definition der relevanten Nutzfahrzeugtypen und -segmente 15
2.2 Beschreibung der Fahrzeugmarktanteile und -entwicklungen 16
2.2.1 Neuzulassungsstrukturen 17
2.2.2 Bestandsstrukturen 18
2.2.3 Außerbetriebssetzungen 19
2.3 Beschreibung der Fahrleistungszusammensetzung und -entwicklung 20
2.3.1 Inlandsfahrleistung der deutschen und ausländischen Nutzfahrzeuge 21
2.3.2 Jahresfahrleistung der deutschen Nutzfahrzeuge 23
2.4 Ermittlung und Strukturierung kaufentscheidender Kriterien 26

3 Stand der Fahrzeugtechnik und Energieträger 32
3.1 Ableitung fahrzeugsegmentspezifischer Basisparameter 32
3.2 Parametrisierung der Antriebsenergieträger 36
3.2.1 Fossile und erneuerbare Dieselkraftstoffe 36
3.2.2 Fossiles und erneuerbares Erdgas 41
3.2.3 Ladestrom 42
3.2.4 Komprimierter und verflüssigter Wasserstoff 44
3.3 Parametrisierung der Antriebsstrangkomponente 45
3.3.1 Verbrennungsmotorische Antriebseinheit 46
3.3.2 Kraftstofftanksystem 48
3.3.3 Elektrischer Antriebseinheit und Brennstoffzellensystem 50
3.3.4 Batteriesystemtypen 52
3.4 Parametrisierung von Automatisierungs- und Vernetzungskomponente 53
3.4.1 Umfeldsensorik 54
3.4.2 Navigations- und Vernetzungssysteme 56
3.4.3 Datenverarbeitung und -speicherung 58

3.4.4 Elektrische Aktuatoren 59

4 Einsatzspezifische Auslegung und Bewertung von antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifischer Nutzfahrzeugkonzepte 61
4.1 Definition der Transportaufgaben und des zeitlichen Einsatzprofils 61
4.2 Konzeption von antriebstrang- und automatisierungsgradspezifischer Fahrzeugkonfigurationen 64
4.2.1 Auslegung von Kraftstoff-Antriebskombinationen 65
4.2.2 Auslegung von Antriebsstrangkonzepten 66
4.2.3 Auslegung von Automatisierungskonzepten 70
4.3 Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs 76
4.4 Dimensionierung der Energiespeicherkapazität unter Berücksichtigung einsatzspezifischer und infrastruktureller Rahmenbedingungen 78

5 Ökonomische Bewertung von antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifischer Nutzfahrzeugkonzepte auf Basis erweiterter Fahrzeugnutzungskosten 86
5.1 Berechnung der Anschaffungskosten 88
5.2 Berechnung der fixen und variablen Betriebskosten 91
5.2.1 Energieverbrauchskosten 92
5.2.2 Fahrerpersonalkosten 94
5.2.3 Instandhaltungskosten 95
5.3 Ableitung der Versicherungskosten auf Basis des Sicherheitspotentials 96
5.3.1 Quantifizierung des Sicherheitspotenzials von Automatisierungskonzepte 98
5.4 Restwertabschätzung 101

6 Entwicklung eines integrierten Fahrzeugmarkt-Simulationsmodells zur szenariobasierten Analyse der Technologiediffusion 104
6.1 Beschreibung der Wechselbeziehungen und Rahmenbedingungen im deutschen Nutzfahrzeugmarkt 105
6.2 Aufbau des Gesamtmarktmodells zur Technologiediffusion 109
6.2.1 Modellierung des Neuzulassungsmarktes 109
6.2.2 Modellierung der Bestandsentwicklung 116
6.2.3 Berechnung des verkehrsbedingten Energie- und CO2-Verbrauchs 119
6.3 Festlegung der Basisparameter 122
6.4 Modellverifikation anhand Parametersensitivität 126
6.5 Modellvalidierung anhand historischen Marktdaten 128

7 Szenarioanalyse des deutschen Straßengüterkraftverkehrs bis 2050 132
7.1 Beschreibung der Szenarien und ihrer Rahmenbedingungen 132
7.1.1 Referenzszenario: Direkte Elektrifizierung 132
7.1.2 Alternativszenario: Indirekte Elektrifizierung 137
7.1.3 Alternativszenario: Automatisierung 140
7.2 Auswertung der technologischen Marktpotenziale und Bestandsentwicklungen 141
7.2.1 Referenzszenario: Direkte Elektrifizierung 141

7.2.2 Alternativszenario: Indirekte Elektrifizierung 146
7.2.3 Alternativszenario: Automatisierung 149
7.3 Analyse der Energie- und Fahrleistungsentwicklungen im Straßengüterkraftverkehr 153
7.3.1 Referenzszenario: Direkte Elektrifizierung 153
7.3.2 Alternativszenario: Indirekte Elektrifizierung 155
7.3.3 Alternativszenario: Automatisierung 157
7.4 Einordnung der Szenarioergebnisse 159

8 Schlussfolgerung und Ausblick 163
8.1 Schlussfolgerung 163
8.2 Wissenschaftlicher Beitrag und Einordnung der Arbeit 169
8.3 Ausblick 172

9 Literaturverzeichnis 174

10 Anhang 193
10.1 Charakterisierung des Straßengüterkraftverkehrs 193
10.2 Stand der Technik 196
10.3 Basisparameter 199
10.4 Marktmodell 201

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wissenschaftliche Einordnung der Forschungsarbeit (eigene Darstellung) 12
Abbildung 2: Aufbau der Dissertation 13
Abbildung 3: Entwicklung der jährlichen Neuzulassungen im deutschen Straßengüterkraftverkehr nach Fahrzeugsegmenten (eigene Auswertung in Anlehnung an [59]) 18
Abbildung 4: Entwicklung des jährlichen Fahrzeugbestands im deutschen Straßengüterkraftverkehr nach Fahrzeugsegmenten (eigene Auswertung in Anlehnung an [57]) 18
Abbildung 5: Altersverteilung des Nutzfahrzeugbestandes für einzelne Fahrzeugsegmente (eigene Darstellung in Anlehnung an [59]) 19
Abbildung 6: Durchschnittliches Bestandsalter und bereinigte Außerbetriebssetzungsalter nach Fahrzeugsegment (eigene Darstellung in Anlehnung an [59]) 20
Abbildung 7: Entwicklung der Inlandsfahrleistung (in FzKm) des Straßengüterkraftverkehrs (in Anlehnung an [49, 50, 61]) 22
Abbildung 8: Charakteristiken der schweren Nutzfahrzeuge (ab 3,5t zGG) nach Heimatsländern in Deutschland im Jahr 2020; Verteilung ihrer Inlandsfahrleistung (links); ihres durchschnittlichen Fahrzeugalters (rechts) (eigene Darstellung in Anlehnung an [50, 63]) 23
Abbildung 9: Häufigkeitsverteilung der Jahresfahrleistung für einzelne Fahrzeugsegmente in Abhängigkeit ihres Fahrzeugalters (eigene Darstellung in Anlehnung an [60]) 24
Abbildung 10: Segmentspezifische Verteilung der Fahrleistung nach Einsatzbereiche mit Angabe der absoluten Fahrleistung in 1.000 km (eigene Darstellung in Anlehnung an [61]) 26
Abbildung 11: Relevante Lkw-Kaufkriterien für den Umstieg auf alternative Kraftstoffe und Antriebskonzepte (Links oben) sowie Fahrautomatisierungssysteme (links unten) (eigene Darstellung in Anlehnung an [66, 67]) 27
Abbildung 12: Funktionale Architektur automatisierter und vernetzter Fahrzeuge (Eigene Darstellung in Anlehnung an [185]) 54
Abbildung 13: Zeitliches Profil einer typischen Transportaufgabe mit menschlichen Aktivitäten (eigene Darstellung) 63
Abbildung 14: Vergleich der zeitlichen Einsatzprofile einer typischen Transportaufgabe mit menschlicher und autonomer Fahrzeugführung unter Berücksichtigung von Ladezeiten (eigene Darstellung) 64
Abbildung 15: Betrachtete Antriebsstrang-, Energie- und Automatisierungskonfigurationen für verschiedene Nutzfahrzeugsegmente im Rahmen der Konzeptauslegung (eigene Darstellung) 65

Abbildung 16: Wesentliche FAS nach Fahraufgaben und ihrer eingreifendtiefe (eigene Darstellung) 71
Abbildung 17: Verteilung des fahrzeuginternen Energiebedarfs der Automatisierungssysteme nach Komponenten und Automatisierungsstufe 76
Abbildung 18: Betrachtete VECTO Geschwindigkeit-Zeit-Profile im Rahmen der Arbeit 77
Abbildung 19: Vorgehensweise zur Dimensionierung der Energiespeicherkapazität unter Berücksichtigung einsatzspezifischer und infrastruktureller Rahmenbedingungen (eigene Darstellung) 79
Abbildung 20: Mehrstufiges Auswahlmethode zur Ermittlung des Sicherheitspotenzial von Automatisierungssystemen (eigene Darstellung) 99
Abbildung 21: Berechnetes Sicherheitspotential je Automatisierungsstufe und Einsatzbereich (dunkle Balken stellen die Mindestpotentiale da, helle Balken die Maximalpotentiale) 101
Abbildung 22: Akteure und Strukturen des Nutzfahrzeugmarktes (eigene Darstellung) 105
Abbildung 23: Agentenspezifisches Neufahrzeugmarkt-Simulationsmodell (konzeptionelles Modell) 110
Abbildung 24: Mehrdimensionale Bewertung von Nutzfahrzeugkonzepten (eigene Darstellung) 113
Abbildung 25: Schematische Darstellung zur Berechnung der verkehrsbedingten CO2-Emissionen unter Berücksichtigung alternativer Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffe (Konzeptionelles Modell) 116
Abbildung 26: Alters- und fahrleistungsbedingte Verbleibekurve je Nutzfahrzeugsegment 118
Abbildung 27: Übersicht Modellverifikation und -validierung (eigene Darstellung auf Basis von [275]) 126
Abbildung 28: Veränderung der Neuzulassung-Marktanteile durch Berücksichtigung alternativer Kraftstoffe, Energieinfrastruktur und Automatisierung gegenüber dem Referenzfall ohne entsprechende Berücksichtigung 127
Abbildung 29: Veränderung des Marktpotenzials von Fahrzeugkonzepten mit Automatisierungsstufe 4 im Segment 40 t Sattelzugmaschinen im Fernverkehr unter verschiedenen Annahmen zur Energieeffizienzwirkung 128
Abbildung 30: Verteilung des Fahrzeugbestands, der Gesamtfahrleistung und des Endenergieverbrauchs nach Fahrzeugsegmenten im Jahr 2030 129
Abbildung 31: Vergleich der simulierten und VECTO-basierten Energieverbräuche schwerer Dieselnutzfahrzeuge in Deutschland 130
Abbildung 32: Vergleich modellierter und statistisch erfasster Marktanteile konventioneller und alternativer Antriebskonzepte im Jahr 2024 131
Abbildung 33: Entwicklung der simulierten Neuzulassungen-Marktanteile für leichte (linke Abbildung) und schwere (rechte Abbildung) Nutzfahrzeuge im Referenzszenario direkte Elektrifizierung 142

Abbildung 34: Entwicklung der durchschnittlichen Gesamtbetriebskosten (TCO) und spezifischen CO2-Emissionen der Neuzulassungsflotten im Referenzszenario direkte Elektrifizierung 144
Abbildung 35: Entwicklung der simulierten Bestands-Marktanteile für leichte und schwere Nutzfahrzeuge im Referenzszenario direkte Elektrifizierung 146
Abbildung 36: Entwicklung der simulierten Neuzulassungen-Marktanteile für leichte (linke Abbildung) und schwere (rechte Abbildung) Nutzfahrzeuge im Alternativszenario indirekte Elektrifizierung 147
Abbildung 37: Entwicklung der durchschnittlichen Gesamtbetriebskosten (TCO) und spezifischen CO2-Emissionen der Neuzulassungsflotten im Alternativszenario indirekte Elektrifizierung im Vergleich zum Referenzszenario (REF) 149
Abbildung 38: Entwicklung der simulierten Bestands-Marktanteile für leichte und schwere Nutzfahrzeuge im Alternativszenario indirekte Elektrifizierung 149
Abbildung 39: Entwicklung der simulierten Neuzulassungen-Marktanteile für leichte (linke Abbildung) und schwere (rechte Abbildung) Nutzfahrzeuge im Alternativszenario Automatisierung 150
Abbildung 40: Entwicklung der durchschnittlichen Gesamtbetriebskosten (TCO) der Neuzulassungsflotten im Alternativszenario Automatisierung im Vergleich zum Referenzszenario (REF) 152
Abbildung 41: Entwicklung der simulierten Bestands-Marktanteile für leichte und schwere Nutzfahrzeuge im Alternativszenario Automatisierung 152
Abbildung 42: Entwicklung der Fahrleistung (links) und des Endenergieverbrauchs (rechts) im Straßengüterkraftverkehr in Deutschland bis 2050 im Referenzszenario „Direkte Elektrifizierung“ 153
Abbildung 43: Entwicklung des durchschnittlichen Energieverbrauchs der Neu- und Bestandsfahrzeugflotte jeweils für leichte (LNF) und schwere Nutzfahrzeuge (SNF) im Referenzszenario „direkte Elektrifizierung“ 154
Abbildung 44: Entwicklung der Fahrleistung (links) und des Endenergieverbrauchs (rechts) im Straßengüterkraftverkehr in Deutschland bis 2050 im Alternativszenario „indirekte Elektrifizierung“ 155
Abbildung 45: Entwicklung des durchschnittlichen Energieverbrauchs der Neu- und Bestandsfahrzeugflotte jeweils für leichte (LNF) und schwere Nutzfahrzeuge (SNF) im Alternativszenario „indirekte Elektrifizierung“ 157
Abbildung 46: Entwicklung Fahrleistung (links) und Endenergieverbrauch (rechts) Straßengüterkaftverkehr in Deutschland bis 2050 Alternativszenario „Automatisierung“ 158
Abbildung 47: Entwicklung des durchschnittlichen Energieverbrauchs der Neu- und Bestandsfahrzeugflotte jeweils für leichte (LNF) und schwere Nutzfahrzeuge (SNF) im Alternativszenario „Automatisierung“ 159
Abbildung 48: Endenergieverbrauch und Gesamtenergieverbrauch des Straßenverkehres im 2050 im Vergleich je Szenario 159

Abbildung 49: Vergleich der Marktpotentiale konkurrierender Antriebsstrang- und Automatisierungstechnologien im schweren Nutzfahrzeugmarkt in verschiedenen Szenarien 165
Abbildung 50: Vergleich des Endenergieverbrauchs im Straßengüterkraftverkehr in Deutschland bis 2050 in verschiedenen Szenarien 167
Abbildung 51: Entwicklung der segmentspezifischen Neuzulassungen zwischen 2005 und 2020 (X-Achse: Jahre, Y-Achse: Neuzulassungen) (eigene Darstellung in Anlehnung an [57, 59]) 193
Abbildung 52: Häufigkeitsverteilung der Außerbetriebssetzung nach Fahrzeugsegmente und Fahrzeugalter (In Anlehnung an [59]) 194
Abbildung 53: Entwicklung der mittlere Jahresfahrleistung in Abhängigkeit ihres Fahrzeugalters (eigene Darstellung in Anlehnung an [60]) 195
Abbildung 54: Literaturübersicht prognostizierter PtL-Gestehungskosten für großskalige Produktionskapazitäten (auf Basis [99–106]) 198
Abbildung 55: Auswertung der Energieinfrastrukturnetzdichte in Deutschland im Jahr 2024 nach Energieträger und Einsatzbereich ([136, 286, 307] sowie Marktdaten) 200

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verkehrliche Entwicklung der deutschen Lkw und Szm (über 6 t zGG) 14
Tabelle 2: Klassifizierung Nutzfahrzeuge (klassischen Aufbauarten) für die Güterbeförderung 16
Tabelle 3: Fahrzeugsegmentspezifische mittlere Jahresfahrleistung 25
Tabelle 4: Median der Leistungsparameter dieselmotorischer Nutzfahrzeuge (Referenzfahrzeuge) 33
Tabelle 5: Leergewicht der antriebs- und fahrerhauslosen Basisfahrzeuge in kg 34
Tabelle 6: Luft- und Rollwiderstandsbeiwerte der antriebs- und fahrerhauslosen Basisfahrzeuge 35
Tabelle 7: Herstellungskosten der antriebs- und fahrerhauslosen Basisfahrzeuge in $EURO_{2020}$ 35
Tabelle 8: Relevante Eigenschaften fossiler, biologischer und synthetische Dieselkraftstoffe 40
Tabelle 9: Vergleich relevanter Eigenschaften fossiles, biologisches und synthetisches CNG und LNG 42
Tabelle 10: Unterscheidung des Ladestroms in Abhängigkeit der Ladeeinrichtung 43
Tabelle 11: Unterscheidung des Wasserstoff-Eigenschaften in Abhängigkeit der Speichertechnologie 45
Tabelle 12: Spezifischen Eigenschaften der Komponente der verbrennungsmotorischen Antriebseinheit 48
Tabelle 13: Spezifische Eigenschaften verschiedener Kraftstofftanksysteme (ohne Kraftstoff) 49
Tabelle 14: Spezifische Eigenschaften der Komponenten der elektrischen Antriebseinheit 51
Tabelle 15: Spezifische Eigenschaften der Hochenergie- und Hochleistungsbatteriepack 52
Tabelle 16: Relevante Eigenschaften der Umfeldsensoren 56
Tabelle 17: Eigenschaften des Kommunikationsmodul, Speichers, Steuergerät und Aktorik für die Auslegung von Automatisierungssystemen 60
Tabelle 18: Beispielhafte Ausprägung wesentlicher Merkmale der Transportaufgabe (eigene Darstellung auf Basis von [11]) 62
Tabelle 19: Normative und technische Beimischungsgrenzen biologischer und synthetischer Dieselkraftstoffe 66
Tabelle 20: Formelsammlung – Längsdynamische Widerstandskräfte [137] 67
Tabelle 21: Formelsammlung – Antriebsstrangspezifische Wirkungsgrade (in Anlehnung an [11]) 68
Tabelle 22: Bandbreite der Kenndaten von batterie-elektrischen Nutzfahrzeugmodellen auf Basis einer Marktauswertung im Jahr 2022 (eigene Auswertung auf Basis von Herstellerangaben) 70

Tabelle 23: Hardwareseitige Ausstattung aktueller Fahrerassistenzsysteme für leichte und schwere Nutzfahrzeuge 72
Tabelle 24: Sensorkonzeptbeispiele für unterschiedliche Automatisierungsgrade beispielhaft für den 26t Lkw (eigene Darstellung) 75
Tabelle 25: Energieeinsparungspotentiale der Automatisierung 78
Tabelle 26: Angenommene fahrzeugsegmentspezifische Ladeleistungsklassen für Schon- und Schnellladung, mit Ladestandard für das entsprechende Ladesystem 83
Tabelle 27: Anschaffung- und Installationskosten der Depot-Ladesäulen nach Leistungsfähigkeit 88
Tabelle 28: Technologiespezifische RPE Aufschläge [230] 89
Tabelle 29: Relevante ökonomische Parameter der Schrittmacher- und Schlüsseltechnologien 91
Tabelle 30: Parameter zur Berechnung des Grundbeitrags für die Haftpflicht- und Kaskoversicherung (eigene Auswertung) 97
Tabelle 31: Mittelwert der segmentspezifischen Jahresbeiträge der Frachtführerhaftpflicht-versicherung (eigene Auswertung) 98
Tabelle 32: Theoretisches Sicherheitspotential für Fahrerassistenzsysteme auf Basis Marktuntersuchungen 100
Tabelle 33: Segmentspezifische Regressionsparameter der Exponentialfunktion nach [244] 102
Tabelle 34: Wesentliche Merkmale zur Ermittlung der Energieinfrastrukturnetzdichte 112
Tabelle 35: Ausgewählte Merkmale zur Charakterisierung von Transportaufgabe je Fahrzeugsegment 124
Tabelle 36: Annahmen und Rahmenbedingungen im Referenzszenario „Direkte Elektrifizierung“ 136
Tabelle 37: Annahmen und Rahmenbedingungen im Alternativszenario „indirekte Elektrifizierung“ 139
Tabelle 38: Annahmen und Rahmenbedingungen im Alternativszenario „Automatisierung“ 141
Tabelle 39: Gegenüberstellung der wesentlichen Merkmale und Ausprägungen verschiedener Fahrzeugmarktmodelle in der VECTOR21 Software 171
Tabelle 40: Anteil ausländischer Fahrten an der Jahresfahrleistung deutscher Nutzfahrzeuge im Jahr 2014 (eigene Berechnung an Anlehnung [60]) 194
Tabelle 41: Marktdaten Diesel-Nutzfahrzeuge im Jahr 2020 (Auszug aus [74]) 196
Tabelle 42: Systemgewicht pro Baugruppe in kg für segmentspezifische Referenzfahrzeuge 197
Tabelle 43: Systemkosten pro Baugruppe in $EURO_{2020}$ für segmentspezifische Referenzfahrzeuge 197
Tabelle 44: Eigenschaften fossiler, biologischer und synthetischer Dieselkraftstoffe 198

Tabelle 45: Technologiereife und Markteinführungszeitpunkte ausgewählter Energieträger, Antriebsstrang- und Automatisierungssysteme 199
Tabelle 46: Spezifischer Energieverbrauch MJ/km [308] 201
Tabelle 47: Spezifischer CO_2-Verbrauch in CO_2/km [308] 202
Tabelle 48: Unterschiede im Endenergieverbrauch des Straßengüterkraftverkehr zwischen Inlandskonzept und Energiebilanz [29] 203

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AC	Alternating Current (Wechselstrom)
Art.	Artikel
BEV	Battery Electric Vehicle (batterieelektrisches Fahrzeug)
Bzgl.	Bezüglich
CH2	Komprimierter Wasserstoff
CNG	Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas)
DC	Direct Current (Gleichstrom)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FHEV	Full Hybrid Electric Vehicle (Vollhybridfahrzeug)
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil (hydriertes Pflanzenöl)
ICE	Internal Combustion Engine (Verbrennungsmotor)
i.d.R	in der Regel
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
LH2	Liquified Hydrogen (verflüssigter Wasserstoff)
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LNG	Liquified Natural Gas (Flüssigerdgas)
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle (Mildhybridfahrzeug)
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Plug-in-Hybridfahrzeug)
PJ	Petajoule

RCO	Relevant Cost of Ownership
REEV	Range Extended Electric Vehicle
TtW	Tank-to-Wheel (von Tank bis Rad – Betriebsemissionen)
SoH	State of Health
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgas(e)
TRL	Technology Readiness Level (Technologiereifegrad)
XTL	X-to-Liquid
WtW	Well-to-Wheel (von Quelle bis Rad – gesamte Energiekette)
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

Vorwort

Die im Rahmen dieser Arbeit erforderliche Datensammlung, -aufbereitung und -interpretation erfolgte unter Berücksichtigung der besonderen Herausforderungen dynamischer Datensätze, die durch die Auswirkungen der Covid-19-Pandemie sowie durch geopolitische Veränderungen im Zeitraum von 2020 bis 2024 geprägt waren. Entsprechende methodisch angemessene Anpassungen in der Datenaufbereitung und -bewertung wurden an den jeweiligen Stellen innerhalb der Arbeit vorgenommen und transparent kenntlich gemacht. Auf diese Weise wurde sichergestellt, dass die zentralen Analyseziele, die langfristige Untersuchung der Technologiediffusion im Fahrzeugmarkt, nicht in unzulässigem Maße durch die dynamischen Rahmenbedingungen verzerrt wurden.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in den Jahren 2018 bis 2024 erarbeitet. Mein besonderer Dank gilt allen Personen, die mich fachlich wie auch persönlich bei der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt und begleitet haben.

Zunächst möchte ich Prof. Dr.-Ing. Tjark Siefkes für die Übernahme des Hauptreferats danken. Seine fachliche Begleitung sowie seine kontinuierliche Förderung haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Matthias Kreimeyer für die Übernahme des Koreferats. Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dr. Stephan Schmid für seine stets konstruktive Unterstützung während der gesamten Promotionszeit.

Darüber hinaus möchte ich meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen sowie den studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern danken, mit denen ich in dieser Zeit zusammenarbeiten durfte. Der fachliche Austausch und die Zusammenarbeit haben diese Arbeit in vielerlei Hinsicht bereichert.

Nicht zuletzt gilt mein herzlicher Dank meiner Familie und meinen Freunden. Ihre Geduld, ihr Rückhalt und ihr Verständnis haben mich während der Promotionszeit wesentlich unterstützt und zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen.

1 Einführung

1.1 Ausgangssituation

Die Entwicklung hin zu einem klimafreundlichen Straßengüterverkehr bleibt trotz effizienter Nutzfahrzeuge eine Herausforderung. So konnten zwischen 1995 und 2020 die spezifischen CO_2-Emissionen von Lastkraftwagen und Sattelzugmaschinen in Deutschland durch inkrementelle technologische Fortschritte bei Verbrennungsmotoren und Kraftstoffstandards um rund 33 Prozent gesenkt werden [1]. Dennoch sind die absoluten CO_2-Emissionen des deutschen Straßengüterverkehrs im betrachteten Zeitraum um 17 Prozent gestiegen [2]. Dies ist primär auf einen mit steigender Transportleistung (plus 25% zwischen 2010 und 2020) wachsenden Bestand an hauptsächlich dieselmotorischen Nutzfahrzeugen (95% im Jahr 2020) zurückzuführen [3]. Im Jahr 2019 verursachte somit der Straßengüterverkehr etwa 35% (7% leichter Straßengüterverkehr, 28% schwere Straßengüterverkehr) der verkehrsbedingten CO2-Emissionen in Deutschland [4]. Güterstrukturelle- und logistische Effekte[1] begünstigten dabei die Nutzung des Straßengüterverkehrs gegenüber anderen Güterverkehrsträgern [5]. Für die Zukunft prognostiziert das Bundesverkehrsministerium in seiner gleitenden Langfrist-Verkehrsprognose, dass die Transportleistung des Straßengüterverkehrs jährlich um etwa 2 % zunehmen könnte [6]. Demgegenüber hat sich Deutschland im Klimaschutzgesetz verpflichtet, bis 2045 in allen Sektoren, einschließlich des Straßengüterverkehrs, Klimaneutralität zu erreichen und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen [7]. Die wesentlichen Maßnahmen zielen dabei insbesondere darauf ab, den Markthochlauf von emissionsarmen und -freien Nutzfahrzeugen (EU-Flottengrenzwerte) sowie die Förderung erneuerbarer Kraftstoffe (Renewable Energy Directive) zu beschleunigen. Gleichzeitig wird ein zunehmender Wettbewerbs- und Kostendruck auf die Transportunternehmen die Nachfrage nach ökonomisch effizienten Transportlösungen intensivieren. Die Effizienzsteigerung des Nutzfahrzeugantriebs, die zu einer Reduktion der CO_2-Emissionen führt, ist daher ein primäres Ziel der Fahrzeugentwicklung, die durch regulatorische Vorgaben getrieben wird.

In Anbetracht des hohen Wirkungsgrades eines Elektromotors stellt die direkte Elektrifizierung des Antriebsstrangs derzeit einen Schwerpunkt der Entwicklungsbestrebungen dar. In diesem Kontext stehen verschiedene

[1] Güterstruktureffekte bezeichnen die mengenmäßige Zunahme an kleinteiligen und oft höherwertigen Gütern (wie Elektrokleingeräte), die in kleinerer Losgröße und in häufigerer Lieferfrequenz transportiert werden. Logistikeffekte bezeichnen die zum Produktionsprozess zeitlich bedarfsynchrone Belieferung der Güter (Just In Time), mit dem Ziel die Lagerbestände und damit die Kosten zu reduzieren [5].

Antriebsstrangtopologien zur Auswahl, darunter hybrid-elektrische, brennstoffzellen-elektrische sowie batterie-elektrische Varianten. Eine wesentliche Herausforderung bei der Antriebsstrangauslegung stellt die Energieverdichtung dar, um den spezifischen Leistungsanforderungen der Transportaufgabe gerecht zu werden. Durch die prinzipiell hohen Energiedichte von Wasserstoff als Antriebsenergieträger stehen ebenfalls wasserstoffbasierte Antriebskonzepte im Fokus. Wie erfolgreich alternative Antriebssysteme am Markt realisiert werden können, hängt unter anderem auch davon ab, ob die entsprechenden Energieträger (Kraftstoffe und Strom) mit der zugehörigen Infrastruktur (Lade- und Tankstellen) in ausreichender Menge und zu akzeptablen Preisen zur Verfügung stehen werden. Hier stellt sich zunächst die Frage nach der Umsetzbarkeit geeigneter Lade- und Tankkonzepte, die die technische Eignung der Antriebskonzepte im jeweils betrachteten Anwendungsfall charakterisiert.

Aus systemischer Betrachtung kann auch eine indirekte Elektrifizierung über die Betankung mit strombasierten Kraftstoffen, aber auch mit biogenen Kraftstoffen, die in bestehenden Motor- und Tanksystemen von Nutzfahrzeugen verwendet werden könnten, betriebliche Vorteile gegenüber der direkten Elektrifizierung bieten. Im Rahmen der verkehrspolitischen Rahmenbedingungen wird daher derzeit der Einsatz alternativer Kraftstoffe in Kombination mit verbrennungsmotorischen Antriebssträngen zur Emissionsminderung im Nutzfahrzeugbereich diskutiert [8]. Dabei sind nicht nur die Unterschiede in der CO_2-Bilanz und den Herstellungskosten im Vergleich zu fossilen Kraftstoffen von entscheidender Bedeutung, sondern vor dem Hintergrund der Ressourceneffizienz und der begrenzten Erzeugungskapazitäten für erneuerbare Energien auch die Unterschiede zwischen den Energieträgern Strom und Wasserstoff sowie deren Derivaten, zu denen auch strombasierte Kraftstoffe gehören.

Komplementär zu den technologischen Entwicklungen im Bereich der Antriebsstränge und Energieträger beeinflussen auf der Gesamtfahrzeugebene sowie im Fahrbetrieb die Automatisierung und Vernetzung, mit einer Vielzahl von Ausprägungsstufen, zunehmend die Einsatzfähigkeit und Wirtschaftlichkeit zukünftiger Nutzfahrzeugkonzepte. Fahrerassistenzsysteme die durch Optimierung der Fahrtrajektorien mittels vorausschauender Fahrweise die Energieeffizienz weiter steigern können, spielen dabei eine wesentliche Rolle. Derzeit werden Fahrerassistenzsysteme hauptsächlich durch regulatorische Verpflichtung zur Steigerung der Verkehrssicherheit im Rahmen der Typengenehmigung in den Markt getrieben [9]. Neben den Potenzialen hinsichtlich Sicherheit und Effizienz wird für autonome Systeme mit der Möglichkeit der Entkopplung von der menschlichen Fahrzeugführung zusätzlich ein flexiblerer Transportbetrieb in Aussicht gestellt. Gerade in Zeiten eines akuten Mangels an Berufskraftfahrern [10] ist der Bedarf an flexiblen Logistiklösungen im Straßengüterverkehr groß, weshalb ein hohes Interesse an autonomen Nutzfahrzeugen erwartet wird.

Schließlich, die fortschreitenden Trends der direkten und indirekten Elektrifizierung sowie der Automatisierung wirken zunehmend auf die Gestaltung zukünftiger Nutzfahrzeugkonzepte ein, beeinflussen die Akzeptanz seitens der Fahrzeugnutzer (Flottenbetreiber) und prägen maßgeblich die strategische Ausrichtung von Nutzfahrzeugherstellern und Energieunternehmen. Gleichzeitig ist es angesichts aktueller Entwicklungen und gesetzlicher Klimazielvorgaben im Straßengüterverkehr erforderlich, die verkehrsbedingten CO_2-Emissionen trotz steigender Transportnachfrage wirksam zu senken, um eine höhere ökologische Effizienz zu erreichen. In diesem Zusammenhang rückt verstärkt der kombinierte Betrachtung der Marktpotentiale nachhaltiger Energieträger, energieeffizienter Antriebskonzepte und innovativer Automatisierungssysteme. Eine fundierte Analyse dieser technologischen Potenziale und ihrer Auswirkungen auf das Entscheidungsverhalten der Marktakteure sowie auf die Marktdurchdringung bildet daher eine zentrale Grundlage, um die Rolle zukünftiger Fahrzeugtechnologien auf dem Weg zur Klimaneutralität im Straßengüterverkehr integriert bewerten zu können.

1.2 Stand der Forschung

Um den skizzierten Herausforderungen im Straßengüterverkehr wissenschaftlich zu begegnen, fokussiert sich diese Arbeit auf die Modellierung und Simulation der Marktdiffusionspotenziale von Elektrifizierungs- und Automatisierungstechnologien im deutschen Straßengüterverkehr. Im Mittelpunkt steht dabei die Untersuchung, wie die Marktdurchdringung dieser Technologien maßgeblich von den Kaufentscheidungen der Marktakteure beeinflusst wird, die wiederum stark von den angebotenen Nutzfahrzeugkonzepten und deren technologischer Entwicklung bestimmt werden. Um eine solide Grundlage für die weiteren Untersuchungen zu schaffen, wird im Folgenden ein umfassender Überblick über den aktuellen Forschungsstand in den Bereichen Technologien, Nutzerakzeptanz und Marktdiffusion sequentiell für direkte und indirekte Elektrifizierung sowie Automatisierung gegeben.

Direkte und indirekte Elektrifizierung

Eine Vielzahl von Untersuchungen in der Forschungslandschaft zur Abbildung zukünftiger Technologieadoptionen im Nutzfahrzeugmarkt fokussiert sich auf Technologien des Antriebsstrangs. Wie in der Dissertation von F. Kleiner [11], die in der gleichen DLR-Forschungsgruppe wie diese Arbeit entwickelt wurde, ist ein agentenbasiertes Modell zur szenariogestützte Simulation der Marktadoption von konkurrierenden Antriebsstrangkonzepten im Nutzfahrzeug-Neuwagenmarkt in Deutschland beschrieben. Innerhalb der Modellstruktur ist ein techno-ökonomisches Bewertungsmodell nach dem Total-Cost-of-Ownership (TCO) Ansatz integriert, dass die relevanten Fahrzeugbetriebskosten von konventionellen und elektrischen Antriebsstrangkonzepten in Abhängigkeit von der Transportaufgabe des

Simulationsagentens ermittelt. Die Kaufentscheidung zwischen diskreten Antriebsalternativen im Modell erfolgt durch den Abgleich von Basisanforderungen hinsichtlich Mindestreichweite und Nutzlastanforderungen mit den Eigenschaften der Transportaufgabe und der Auswahl der Fahrzeugalternativen mit den geringsten Gesamtbetriebskosten. Der Einfluss der Ladeinfrastruktur auf die Auswahlwahrscheinlichkeit elektrischer Antriebssysteme wird durch die Berücksichtigung der Anschaffungs- und Betriebskosten für Depot-Ladestationen in der TCO-Berechnungsstruktur erfasst. Im Vergleich zur der Vorgehensweisen in [11], sind in den Analysen [12] und [13] erweiterte monetäre Einflüsse durch die Berücksichtigung des Ladeprozesses in der Entscheidungsfindung zwischen alternativen Antriebstechnologien abgebildet. Innerhalb der Betriebskostenrechnungen sind hierfür mögliche zusätzliche Arbeitskosten einberechnet, die durch die längere Zeit für das Betanken innerhalb der Standzeiten entstehen. In der Untersuchung [14] wird die betriebliche Eignung von Nutzfahrzeugen mit alternativen Antrieben anhand spezifischer Nutzungsszenarien und der dazugehörigen Energieinfrastruktur bewertet. Dabei werden mehrere Kriterien berücksichtigt. Der Bewertungsprozess erfolgt durch einen systematischen Abgleich der technischen Spezifikationen der Antriebstechnologien mit den Anforderungen der Nutzungsszenarien. Der Erfüllungsgrad der einzelnen Antriebstechnologien wird jedoch qualitativ bewertet, da der Schwerpunkt auf der Beurteilung der grundsätzlichen Praxistauglichkeit und Anpassungsfähigkeit der Technologien liegt. Daneben werden in den marktdiffusionstheoretischen Untersuchungen [15] und [16] neben der Betriebskostenaspekte auch die Verfügbarkeit des Modellangebots für die Auswahl der geeigneten Antriebsoption herangezogen.

Der Einfluss der Verfügbarkeit der Strominfrastruktur zusammen mit der Fahrzeugreichweite auf die Bewertung der Eignung elektrischer Pkw mit typische Einsatzprofilen wurde erstmals in der Dissertation von B. Propfe [17] untersucht, die ebenfalls in derselben DLR-Forschungsgruppe wie diese Arbeiten entwickelt wurde. In der Untersuchung wird die Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur als exogener Parameter in der Modellierung definiert, der die relative Abdeckung der Strominfrastruktur innerhalb einer Region repräsentiert. Allerdings wird nicht der Grad der Eignung der Fahrzeugkonzepte über die Berücksichtigung spezifischer Eigenschaften der Energieinfrastruktur und den Nutzeranforderungen zur Bewertung herangezogen.

Innerhalb der beschriebenen sequentiellen Ansätze zur Bewertung der betrieblichen Eignung von alternativen Nutzfahrzeugen existieren Bewertungsansätze zur Bewertung konkurrierender Antriebskonzepte im Nutzfahrzeugbereich, die mehrere Kriterien gleichzeitig berücksichtigen und die Wahl aufgrund von Präferenzen der Nutzer treffen. Dies zeigt sich in der Untersuchung [18], welches ein Diffusionsmodell für alternative Antriebstechnologien im Nutzfahrzeugmarkt vorstellt und zwischen zwei Kaufentscheidungsansätzen für entsprechend zwei disjunkte Hauptkäufergruppen

unterscheidet. Nach dem reinen TCO-Ansatz werden günstige Antriebsoptionen von Käufergruppe nachgefragt. Der Discrete-Choice-Ansatz mittels einer Logit-Funktion beschreibt die Wahlwahrscheinlichkeit einer bestimmten Antriebsart basierend auf mehreren Parametern, darunter sowohl monetäre als auch nicht-monetäre Aspekte wie Reichweite, Akzeptanz und Verfügbarkeit von Infrastruktur. Diese nicht-monetären Parameter wurden durch Befragungen und Experteneinschätzungen definiert und fließen als fiktive Zusatzkosten in das Modell ein. Die Logit-Funktion berechnet daraufhin die Wahrscheinlichkeit der Wahl einer bestimmten Antriebsart, indem sie den Gesamtnutzen dieser Parameter abwägt. Allerdings werden die konkreten Werte für die Parameter nicht explizit aufgelistet und sind laut der Autoren intern im Modell kalibriert und angepasst. Zudem wird im Bericht beschrieben, dass im Zeitverlauf der Simulation alle Käufergruppen zunehmend nach dem TCO-Ansatz agieren, da Akzeptanz- und Unsicherheitsbarrieren abgebaut werden.

In dem Modellansatz [19] zur Simulation der Markteinführung alternativer Antriebsoptionen im Nutzfahrzeugmarkt in den USA wird das Kaufverhalten von Flottenbetreibern anhand von 16 monetären und nicht-monetären Entscheidungsfaktoren modelliert. Zu den nicht-monetären Faktoren zählen unter anderem Reichweite, Verfügbarkeit von Antriebsmodellen und Infrastruktur sowie Umweltaspekte. Jeder Entscheidungsfaktor wird quantitativ bewertet, wobei eine Wahrscheinlichkeit angibt, wie stark dieser Faktor die Entscheidung für den Kauf eines bestimmten Fahrzeugs im Vergleich zu einem konventionellen Fahrzeug beeinflusst. Allerdings wird die Relevanz der einzelnen Faktoren in der Modellierung durch Kalibrierung und Anpassungen im Modell festgelegt. Die genauen Werte oder das Gewicht jedes einzelnen Faktors werden im Bericht nicht explizit offengelegt, sondern beruhen auf einer Mischung aus empirischen Daten, Experteneinschätzungen und Modellkalibrierungen.

- ➔ **Nutzerakzeptanz**: Trotz der vielfältigen Ansätze zur Bewertung von Antriebsstrangkonzepten für Nutzfahrzeuge existiert bislang kein umfassender Bewertungsansatz, der sowohl den betrieblichen Anforderungen als auch den nutzerspezifischen Präferenzen in ausreichendem Maße gerecht wird. Insbesondere fehlt eine detaillierte Modellierung, die die Verfügbarkeit und Integrationsfähigkeit von Tank- und Ladeinfrastrukturen in den Entscheidungsprozess einbezieht, wobei die spezifischen Einsatzprofile der Nutzfahrzeuge berücksichtigt werden.

Die bisherige Forschung hinsichtlich der Bewertung der Marktpotenziale alternativer Kraftstoffen hat sich hauptsächlich auf den Pkw-Markt konzentriert. Dagegen existiert eine Vielzahl von Veröffentlichung, die die grundsätzlichen Eigenschaften alternativer Kraftstoffe untersucht, wobei der Fokus häufig variiert. Während einige Studien detaillierte technische Merkmale, wie die physikalischen und chemischen

Kraftstoffeigenschaften beleuchten, beschränken sich andere auf aggregierte Herstellungskosten für allgemeine Kraftstoffgruppen. Eine mehrkriterielle Parametrisierung synthetischer Kraftstoffe anhand der Definition verschiedener Herstellungspfade wurde in dem Bericht [20] vorgestellt. Biologische Kraftstoffe sind in dieser Analyse jedoch vernachlässigt. In der Untersuchung [21] wurden die Gesamtbetriebskosten und die Treibhausgasemissionen von schweren Sattelzugmaschinen für fossilen, biologischem und synthetischem Diesel sowie Biomethan und synthetischem Methan in CNG- und LNG-Lkw im Vergleich untersucht. Dabei zeigte sich, dass insbesondere der Einsatz von synthetischem Methan in LNG-Lkw eine deutliche Reduktion der Treibhausgasemissionen ermöglichen kann. Biologische und synthetische Diesel hingegen bieten eine vergleichbare Klimabilanz wie fossiler Diesel, jedoch mit einem geringeren Potenzial zur Emissionsreduktion. Die Untersuchung ist dahingehend limitiert, dass sie sich ausschließlich auf das Fahrzeugsegment der schweren Sattelzugmaschinen konzentriert und nur allgemeine Kraftstoffgruppen, ohne dabei spezifische fahrzeugtechnische Anpassungen aufgrund von Kraftstoffnormen oder deren Auswirkungen zu diskutieren. Ferner wurden weitere etablierte TCO-Modelle für leichte und schwere Nutzfahrzeuge, in [12, 22–24], hinsichtlich der Bewertung für alternative Kraftstoffe reflektiert.

➔ **Technologie**: Die bisherige Forschung zur Bewertung der Marktpotenziale alternativer Kraftstoffe konzentriert sich überwiegend auf den Pkw-Markt und lässt dabei Nutzfahrzeuge, insbesondere in Bezug auf biologische und synthetische Kraftstoffe, weitgehend unberücksichtigt. Zwar existieren zahlreiche Einzelstudien zu den technischen Eigenschaften, Herstellungskosten, Treibhausgasemissionen und weiteren Aspekten verschiedener Energieträgerarten, jedoch fließen diese bisher nicht in eine umfassende Bewertung von Nutzfahrzeugkonzepte ein. Es fehlt somit eine umfassende Analyse der technischen, ökonomischen und ökologischen Auswirkungen alternativer Energieträger auf die Auslegung und Bewertung von Nutzfahrzeugkonzepten.

Hinsichtlich der zu Beginn vorgestellt Dissertation von F. Kleiner [11] werden die Marktanteile der Nutzfahrzeugantriebe durch Aggregation der Kaufentscheidungen der einzelnen Simulationsagenten in verschiedenen Szenarien simuliert. Die szenariobasierte Simulation der Marktanteile orientiert sich an den europäischen CO_2-Emissionsstandards für Neufahrzeuge [25]. Im Gegensatz zu Adoptionsmodellierungen, die sich analytisch mit der Frage beschäftigen, wie Käufer im Neuwagenmarkt eine neue Fahrzeugtechnologie aufnehmen, berücksichtigen Diffusionsmodelle die zeitliche und räumliche Ausbreitung der Fahrzeugtechnologie bzw. Fortschreibung der Marktpotentiale innerhalb eine größeren Makroökonomie, wie dem Bestandswagenmarkt. [26, 27] Ein Gesamtmodell, welches die Diffusion von Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffen im Pkw-Markt simuliert, wobei sowohl die Marktanteile als auch die CO_2-Emissionen berechnet werden, ist in der Dissertation

von P. Mock [28], welche ebenfalls innerhalb derselben DLR Forschungsgruppe wie diese Arbeit entwickelt wurde, enthalten.

In der Forschungslandschaft ist insbesondere das Emissionsberechnungsmodell TREMOD (Transport Emission Model) bekannt, welches für den gesamten Straßenverkehr die Fahrzeugbestände, Fahrleistungen und Emissionen bis 2050 berechnet und der nationalen und internationalen Berichterstattung über Treibhausgase und andere Schadstoffe dient [29]. Für die spezifische Modellierung des Straßengüterverkehrs, wie sie im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wird, lassen sich allerdings mehrere Limitationen feststellen: So wird die Motorisierungsrate bzw. Marktpotentiale der Antriebsstränge als exogene Eingabe in das Modell integriert, ohne dass eine Rückkopplung mit der Bestandsentwicklung erfolgt. Dadurch findet keine direkte Verbindung zwischen technologischen Entwicklungen und Marktadoptionsprozessen statt. Zudem sind aufgrund der begrenzten Segmentierung die Flottenerneuerungsraten für verschiedene Nutzfahrzeugtypen aggregiert. Bei den Antriebsarten werden hauptsächlich Diesel und Benzin betrachtet, während alternative Antriebe wie batterieelektrische Fahrzeuge (BEV), Plug-in-Hybride (PHEV) und gasbetriebene Fahrzeuge (CNG/LNG) nur in begrenztem Maße berücksichtigt werden. Zukünftige Entwicklungen wie synthetische Kraftstoffe und die Automatisierung des Verkehrs werden im Modell aktuell nicht berücksichtigt.

Weitere relevante Veröffentlichungen, die insbesondere die Marktdurchdringung von synthetischen Kraftstoffen untersuchen, sind in [20, 30] beschrieben. In den Szenarioanalysen werden verschiedenen Zielszenarien mit unterschiedlichen technologischen Ausrichtungen zur Klimaneutralität in Deutschland bis 2045 untersucht. Allerdings wurde die Nachfrage nicht auf Basis der Nachfragepotenziale im Absatz- oder Bestandsmarkt gekoppelt, sondern die Auswirkungen für den Verkehr wurden durch exogene Beimischungsmengen für klimaneutrale Kraftstoffe in bisherigen fossile Kraftstoffe bewertet. Zudem lag der Fokus auf allgemeinen synthetischen Kraftstoffgruppen, ohne eine Differenzierung der verschiedenen Derivatprodukte mit spezifischen Eigenschaften vorzunehmen. Des Weiteren wurden weitere Untersuchungen in [31–33] sowie in den Metauntersuchungen [34, 35] hinsichtlich der Methodik zu Abbildung der Marktdiffusion von Nutzfahrzeugen mit alternativen Kraftstoffen und Antriebssysteme reflektiert.

- ➔ **Marktdiffusion**: Trotz existierender Modelle zur Diffusion von Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffen gibt es noch keine umfassende Marktmodellierung, die spezifisch auf den Nutzfahrzeugbereich abzielt. Insbesondere fehlt ein Modell, das die Marktdiffusion alternativer Energieträger und Antriebskonzepte sowie deren Wechselwirkungen mit dem Fahrzeugbestand integriert. Aktuelle Studien beschränken sich auf allgemeine Kraftstoffgruppen und exogene Beimischungsraten, ohne eine detaillierte Differenzierung spezifischer

Derivatprodukte oder eine Angebotsseitige Abbildung potenzieller Kraftstoffoptionen vorzunehmen.

Automatisierung

In der wissenschaftlichen Literatur wird intensive über die Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen und autonomen Systemen in der Logistik- und Transportbranche diskutiert. Die Untersuchung in [36] hebt hervor, dass die Automatisierung in dieser Branche als entscheidender Faktor zur Senkung von Betriebskosten und zur Steigerung der Effizienz gesehen wird. Insbesondere der Wegfall von Fahrergehältern und die Optimierung betrieblicher Prozesse tragen maßgeblich zu diesen Vorteilen bei. Darüber hinaus betont die Arbeit [37] die potenzielle Sicherheitssteigerung durch die Automatisierung von Fahrzeugen. Die Untersuchung zeigt, dass menschliche Fehler eine Hauptursache für Verkehrsunfälle darstellen und dass automatisierte Systeme dazu beitragen können, diese Risiken signifikant zu reduzieren. Jedoch fehlt bislang eine gezielte Untersuchung, die den Einfluss dieser Aspekte auf die Auswahlwahrscheinlichkeit solcher Systeme durch Flottenbetreiber in Deutschland analysiert. Insbesondere bleibt unklar, wie stark die potenziellen Sicherheitsvorteile von Automatisierungssystemen die Entscheidungsfindung in dieser Zielgruppe beeinflussen.

Hingegen ist die Anzahl der Veröffentlichungen zur Quantifizierung der Energieeinsparungseffekte und Sicherheitspotenziale von Automatisierungssystemen in den letzten Jahren gestiegen. Viele dieser Untersuchungen basieren jedoch hauptsächlich auf simulationsgestützten Experimenten. In dem Bericht [38] wird der Energieverbrauch unter Berücksichtigung sowohl des potenziellen Mehrverbrauchs durch zusätzliche Automatisierungskomponenten als auch des Einsparpotenzials durch effizienteres Fahren berechnet. Jedoch wird der Energieverbrauch dabei für alle Nutzfahrzeuggrößenklassen aggregiert. Ähnliche Studien [39, 40] haben den Energieverbrauch für autonome Pkw untersucht. In weiteren Untersuchungen [41, 42] wurden spezifische Fahrerassistenzsysteme in ausgewählten Einsatzgebieten betrachtet. In Bezug auf das Sicherheitspotential liefert eine umfassende Grundlage die Studie [43], die fundierte Erkenntnisse über die Wirksamkeit von Fahrerassistenzsystemen in Unfallszenarien, insbesondere bei Nutzfahrzeugen, liefert. Jedoch fehlt eine Abschätzung des Sicherheitspotentials auf Fahrzeugebene unter Berücksichtigung der Konfigurationen einzelner Systeme.

➔ **Technologie**: Zusammenfassend zeigt der aktuelle Forschungsstand, dass trotz der Fortschritte in der Abschätzung von Effizienz- und Sicherheitspotenzialen weiterhin spezifische Forschungsdefizite bestehen. Insbesondere fehlt eine differenzierte Abschätzung der Potenziale auf Fahrzeugebene, die unterschiedliche Automatisierungsgrade berücksichtigt und deren Auswirkungen im Hinblick auf Systemarchitektur, Energiebedarf, Sicherheitspotential und

Betriebskosten untersucht. Es fehlt schließlich eine umfassende Analyse der technischen, ökonomischen und ökologischen Einflüsse automatisierter Fahrsysteme auf Nutzfahrzeugkonzepte.

Die Betriebskosten autonomer Nutzfahrzeuge wurden in den Untersuchungen [44–46] analysiert, wobei in der Regel vollautonome Systeme der Stufe 5 im Fokus standen. In allen Veröffentlichungen beruhen die Berechnungen der Gesamtbetriebskosten auf Annahmen zu verschiedenen Kostenfaktoren im Vergleich zu manuell betriebenen Nutzfahrzeugen. Es wurden jedoch keine detaillierten Berechnungen spezifischer Betriebskostenbestandteile, wie etwa der Energieverbrauchskosten oder der Versicherungskosten, durchgeführt. Zudem erfolgte die Berechnung der Mehrkosten für die Automatisierungsausstattung auf Fahrzeugebene, ohne eine präzise Bottom-up-Aufschlüsselung der einzelnen Automatisierungskomponenten vorzunehmen. Eine weitere Einschränkung dieser Studien besteht darin, dass keine Differenzierung zwischen verschiedenen Automatisierungsgraden und Nutzfahrzeugsegmenten vorgenommen wurde.

➔ **Nutzerakzeptanz**: Eine tiefgehende technisch-ökonomische Bewertung von Nutzfahrzeugkonzepten, die unterschiedliche Automatisierungsgrade umfassen, fehlt bisher. Besonders die Untersuchung der Zusammensetzung und Entwicklung zukünftiger Betriebskostenbestandteile für diese Konzepte wurde bislang nicht hinreichend berücksichtigt, was die Nutzerakzeptanz erheblich beeinflussen könnte. In diesem Zusammenhang bleibt auch der Einfluss potenzieller Sicherheitsvorteile auf die Entscheidungsfindung von Flottenbetreibern weitgehend unerforscht.

In der Studie [47] wurde die Durchdringung ausgewählter Automatisierungsfunktionen im Pkw-Bestand anhand von exogenen Markthochlaufkurven untersucht, die wiederum auf historischen Marktdaten zur Einführung und Verbreitung früherer Fahrerassistenzsysteme basieren. Eine detailliertere Untersuchung der Marktdiffusion automatisierter Pkw und Lkw wird in [38] gegeben. Auf Basis technisch-ökonomischer Berechnungen wird die Marktdurchdringung für verschiedene Automatisierungsgrade untersucht. Durch die Zuordnung von Technologien zu Automatisierungsstufen werden bottom-up die Technologiekosten und Degressionspotenziale für jede Automatisierungsstufe ermittelt. Die Betrachtung der Gesamtbetriebskosten basiert auf vereinfachten Annahmen zu Effizienzpotenzialen, Fahrerkosten, Versicherungskosten sowie Wartungs- und Reparaturkosten. Allerdings wird keine dynamische Berechnung der einzelnen Betriebskosten basierend auf der spezifischen Konfiguration der Automatisierungsstufen. Zudem wird lediglich ein Lkw-Größenklassen betrachtete, die hinsichtlich dem Einsatz in Nah- und Fernverkehr unterschieden wird. In der Szenarioanalyse wird zudem eine Zahlungsbereitschaft für die Ausstattung der Automatisierungstechnologie auch im kostensensitiven

Nutzfahrzeugmarkt angenommen. Unter Berücksichtigung von Markteinführungsjahre für einzelne Automatisierungsstufen wird die Marktdiffusion untersucht. Auf dieser Basis identifiziert die Studie das Reduktionspotenzial von automatisierten Fahrzeugen im Verkehr, um daraus den Einfluss auf die Entwicklung der verkehrsbedingten THG-Emissionen zu ermitteln. Aufbauend auf den simulierten Marktdurchdringungsraten automatisierter Fahrzeuge in [47] untersucht die Studie [38] den zusätzlichen Endenergieverbrauch an Bord eines Pkw für jede Automatisierungsstufe. Obwohl Annahmen zum Mehrverbrauch durch Automatisierungs- und Vernetzungskomponenten berücksichtigt werden, bleibt deren Einfluss auf die Antriebsstrangauslegung unberücksichtigt.

➔ **Marktdiffusion**: Ein umfassendes Diffusionsmodell, das die Entscheidungsfindung für Nutzfahrzeuge mit verschiedenen Antriebskonzepten und Automatisierungsgraden integriert, ist bislang nicht vorhanden. Besonders fehlt eine Bottom-up Bewertung von Automatisierungssystemen, die die Kostenentwicklung einzelner Automatisierungskomponenten und deren Degressionspotenziale über die Zeit hinweg abbildet.

Zusammenfassend bestehen Forschungslücken in den aufgezeigten Bereichen, die zunächst vertieft untersucht werden müssen, um eine umfassende Gesamtsystemmodellierung aufzubauen. Insbesondere fehlt es an einem Modellansatz, der die Simulation der Marktdiffusionspotenziale von alternativen Energieträgern und Antriebskonzepten in Verbindung mit Automatisierungssystemen im Straßengüterverkehr berücksichtigt. Bisherige Veröffentlichungen behandeln diese Aufgabenstellung nicht. Dabei ist es relevant, den Einfluss der Elektrifizierung und Automatisierung auf die technischen, ökonomischen und ökologischen Eigenschaften der Fahrzeugkonzepte zu untersuchen sowie deren Auswirkungen auf die Auswahlentscheidungen der Marktakteure zu verstehen.

1.3 Zielstellung der Arbeit

Im Rahmen der wissenschaftlichen Dissertation wird ein integriertes Fahrzeugmarkt-Simulationsmodells zur szenariobasierten Untersuchung der Marktdurchdringung von Elektrifizierungs- und Automatisierungstechnologien im Nutzfahrzeugmarkt vorgestellt. Die dynamische Berechnung der Nutzfahrzeugflotte erfolgt dabei durch die Kopplung einer agentenbasierten Neufahrzeugmarktsimulation mit der verkehrlichen Untersuchung der resultierenden Bestandsflotte. Hierfür werden zunächst die Eigenschaften verschiedener Kraftstoffarten, Antriebsstrang- und Automatisierungskonzepte ermittelt und für die Auslegung von antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifischen Nutzfahrzeugkonzepte zugrunde gelegt. Anschließend werden die Anforderungen der Nutzer für die betrachteten Nutzfahrzeugkonzepte systematisch beschrieben. Auf dieser Grundlage erfolgt eine

Bewertung der Einsatzfähigkeit und Wirtschaftlichkeit antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifischer Nutzfahrzeugkonzepte. Der daraus resultierende mehrdimensionale Bewertungsansatz wird in ein agentenbasiertes Neufahrzeugmarktmodell integriert, das die technologischen Potenziale konkurrierender Antriebsstrang- und Automatisierungskonzepte im Neuzulassungsmarkt simuliert. Zur Beschreibung der Entwicklung der Fahrzeugbestandsflotte wird das Marktmodell mit einem dynamischen Stock-and-Flow-Modell gekoppelt. Dieses bildet den Fahrzeugbestand sowie die damit verbundenen verkehrsbedingten Energieverbräuche und CO_2-Emissionen über den Zeitverlauf ab und ermöglicht die Ableitung möglicher Diffusionspfade der betrachteten Technologien. Dies erlaubt nicht nur die technologischen Potenziale, sondern auch die Auswirkungen auf die Entwicklung der verkehrsbedingten Emissionen umfassend zu analysieren. Das resultierende, kohärente Gesamtmodell wird exemplarisch auf den deutschen Straßengüterverkehr angewendet. Mithilfe der DLR-Simulationssoftware VECTOR21 werden hierzu Marktsimulationen in drei Szenarien mit einem Zeithorizont bis 2050 durchgeführt. Dabei werden insbesondere technologische, infrastrukturelle, nutzerspezifische und gesetzliche Marktbarrieren für die betrachteten Fahrzeugkonzepte analysiert.

Das übergeordnete Ziel dieser Forschungsarbeit besteht darin, aus der Analyse der technologischen Potenziale und Auswirkungen geeignete Handlungspfade für den Nutzfahrzeugmarkt abzuleiten, die unter verkehrsökologischen Zielsetzungen zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs in Deutschland bis 2050 beitragen. Zur Erreichung dieser Zielsetzung werden folgende Forschungsfragen formuliert:

- Wie entwickeln sich die Marktanteile antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifischer Nutzfahrzeugkonfigurationen im deutschen Neuwagenmarkt in unterschiedlichen Technologieszenarien zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs?
- Wie hoch sind die Integrationspotenziale alternativer Kraftstoffe unter Berücksichtigung der antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifischen Bestandsflottenzusammensetzung im Hinblick auf die Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs?
- Welche Auswirkungen hat die Marktdurchdringung alternativer Energieträger und Nutzfahrzeugkonfigurationen auf den Endenergieverbrauch des Straßengüterverkehrs in Deutschland in unterschiedlichen Technologieszenarien zur Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs?

Diese Arbeit schließt somit die in der aktuellen Forschungsliteratur identifizierten Lücken, indem sie einen umfassenden technologische Marktmodellierung des deutschen Straßengüterverkehrs verfolgt. Die definierten Aufgabenstellungen adressieren gezielt die bisherigen Forschungslücken in den Bereichen direkter und

indirekter Elektrifizierung sowie Automatisierung, siehe Abbildung 1, die in der bestehenden wissenschaftlichen Literatur bislang unzureichend behandelt wurden. Dadurch wird ein wesentlicher Beitrag zur wissenschaftlichen Vertiefung zukünftiger technologischer und ökologischer Entwicklungen im Straßengüterverkehr geleistet.

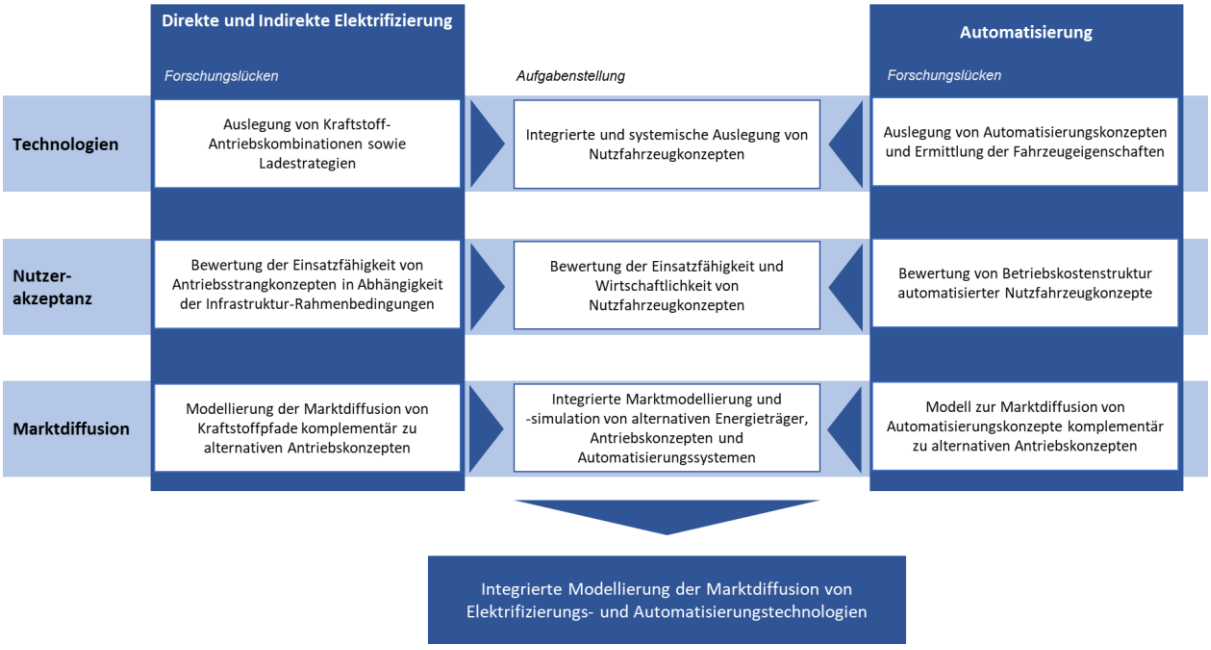


Abbildung 1: Wissenschaftliche Einordnung der Forschungsarbeit (eigene Darstellung)

1.4 Aufbau der Arbeit

Die Vorgehensweise und Zuordnung der Inhalte zu den Kapiteln der Forschungsarbeit sind in Abbildung 2 dargestellt. Diese gliedert sich in vier Schritte: Ausgangsanalyse, methodische Modellentwicklung, Modellanwendung und Schlussfolgerung.

Im ersten Teil, der Ausgangsanalyse, erfolgt die Quantifizierung der für die Modellentwicklung erforderlichen Eingangsparameter. Zunächst wird in Kapitel 2 eine umfassende empirische Auswertung der Marktstrukturen und der Fahrleistungszusammensetzung im deutschen Straßengüterverkehr auf Basis aktueller Datengrundlagen durchgeführt. Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 die Eigenschaften konventioneller und alternativer Energieträger, Antriebssysteme sowie Automatisierungstechnologien systematisch parametrisiert und entsprechend des aktuellen Forschungsstands beschrieben.

Der zweite Teil umfasst die methodische Modellentwicklung. In Kapitel 4 werden die einsatzspezifische Auslegung und Bewertung von antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifischen Nutzfahrzeugkonzepten beschrieben. Daran

anschließend erfolgt in Kapitel 5 die ökonomische Bewertung dieser Konzepte auf Basis erweiterter Fahrzeugnutzungskosten. Die in den Kapiteln 4 und 5 entwickelten Bewertungsansätze werden in Kapitel 6 zu einem integrierten Fahrzeugmarkt-Simulationsmodell zusammengeführt, das aus einem agentenbasierten Neufahrzeugmarktmodell und einem dynamischen Bestandsflottenmodell besteht. Durch die Integration der mehrdimensionalen Entscheidungsmethodik in das Marktmodell wird eine direkte Verbindung zwischen der Analyse individueller Kaufentscheidungen und der Modellierung der gesamtmarktlichen Technologieadoption hergestellt.

Im dritten Teil erfolgt die Modellanwendung. In Kapitel 7 wird das entwickelte Gesamtmodell zur szenariobasierten Untersuchung der Technologiediffusion im deutschen Straßengüterverkehr bis zum Jahr 2050 angewendet. Die Ergebnisse für ein Referenz- sowie zwei Alternativszenarien werden dargestellt, analysiert und im Hinblick auf die nationalen Klima- und Verkehrszielsetzungen interpretiert. Die Arbeit schließt mit Kapitel 8, das die zentralen Schlussfolgerungen zusammenfasst und einen Ausblick auf zukünftige Forschungsansätze gibt.

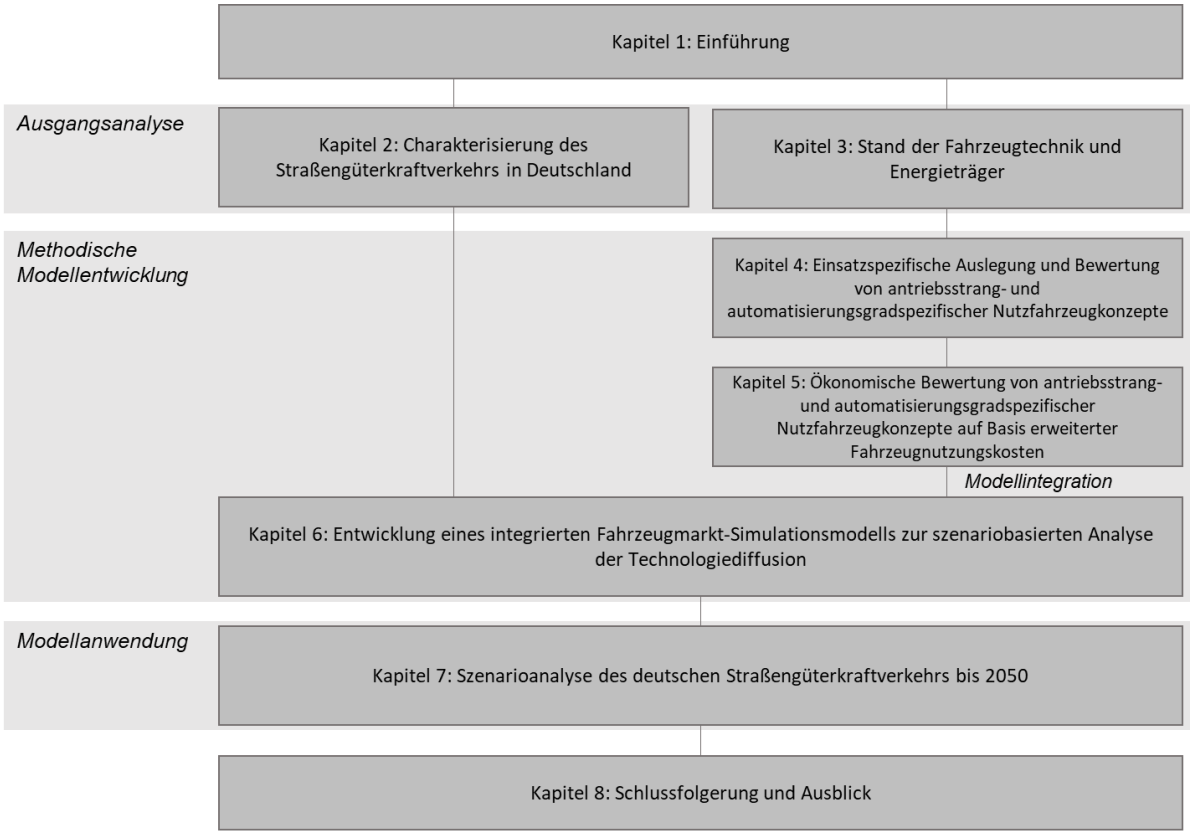


Abbildung 2: Aufbau der Dissertation

2 Charakterisierung des Straßengüterkraftverkehrs in Deutschland

Die transportierte Menge des deutschen Straßengüterverkehrs korreliert historisch eng mit der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung im Inland bzw. dem Bruttoinlandsprodukt (BIP) [48]. Sie ist zwischen 2010 und 2020 in Deutschland um 14 % gestiegen (siehe Tabelle 1). Dies führte zu einer Zunahme der Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen und damit zu einem um 15 % höheren Verkehrsaufkommen (Summe aus Last- und Leerfahrten) im selben Zeitraum. Zur Beurteilung der Effizienz des Güterverkehrs ist es jedoch erforderlich, neben der reinen Transportmenge auch die Verkehrsleistung zu betrachten, da sie angibt, wie viele Kilometer die Fahrzeuge (Fahrzeugkilometern, Fzkm) insgesamt zurückgelegt haben. Die Verkehrsleistung nahm in dem betrachteten Zeitraum um 4 % (Inlandsverkehr) zu. Die Transportleistung, die zusätzlich zur Strecke auch die transportierte Menge an Gütern im Verhältnis setzt und in Tonnenkilometern (tkm) gemessen wird, stieg im gleichen Zeitraum ebenfalls um etwa 4 % (Inlandsverkehr) an. Daraus lässt sich ableiten, dass die mittlere Auslastung der Fahrzeuge, auch definiert als das Verhältnis von Transportmenge zu Verkehrsaufkommen, zwischen 2010 und 2020 relativ konstant blieb. Das bedeutet wiederum, dass zwar mehr Güter transportiert, die Fahrten jedoch nicht effizienter ausgelastet wurden. Für die technologische Bewertung sowie die im Hinblick auf diese Arbeit relevante Analyse der verkehrsbedingten CO_2-Emissionen des Straßengüterkraftverkehrs sind die Größen: Fahrzeugbestand und Verkehrsleistung, wesentlich zu betrachten.

Tabelle 1: Verkehrliche Entwicklung der deutschen Lkw und Szm (über 6 t zGG)

	Fahrzeug-bestand	**Verkehrs-aufkommen**		**Transportmenge**		**Verkehrsleistung**		**Transport-leistung**	
		Last-fahrten	Leer-fahrten	Gesamt-verkehr	Inlandsv-erkehr	Gesamt-verkehr	Inlands-verkehr	Gesamt-verkehr	Inlands-verkehr
Einheit	*Anzahl*	*in Mio. Fahrten*		*in Mrd. t*		*in Mrd. Fzkm*		*in Mrd. tkm*	
2010	223.572	224,9	135,2	2,73	2,72	28,81	26,81	313,10	281,89
2020	257.783	258,7	153	3,12	3,11	29,18	28,01	304,61	286,38

Quelle: Eigene Darstellung basierend auf [49, 50]

In diesem Zusammenhang ist zudem auch zu erwähnen, dass die Bezeichnung Straßengüterkraftverkehr gegenüber der Bezeichnung Straßengüterverkehr zutreffender ist, da dieser den Transport von Gütern mit motorisierten Kraftfahrzeugen in den Vordergrund stellt. Zudem fallen auch nach der Definition in §1 Abs. 1 Straßengüterfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht

Güterkraftverkehrsgesetz (GüKG) unter 3,5 t unter die Bezeichnung Straßengüterkraftverkehr.

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels erfolgt eine detaillierte Differenzierung der einzelnen Nutzfahrzeugtypen und -segmente des Straßengüterkraftverkehrs, die Beschreibung ihrer Marktanteile und -entwicklungen sowie ihrer Fahrleistungszusammensetzung in Deutschland auf Basis amtlichen Fahrzeug- und Verkehrsstatistik. Ziel ist es die Basisparameter für die Fahrzeugmarktmodellierung in Kapitel 6.2.2 zu definieren. Abschließend werden die kaufentscheidenden Kriterien für die Anschaffung von Nutzfahrzeugen empirisch ermittelt und systematisch strukturiert. Sie bilden die Grundlage für die Bewertungsansätze in den Kapiteln 4, 5 und 6.

2.1 Definition der relevanten Nutzfahrzeugtypen und -segmente

In Deutschland und in Europa werden Kraftfahrzeuge nach den Kriterien der Verordnung (EU) 2018/858 systematisiert und in die EG-Fahrzeugklassen eingeteilt [51]. Als Nutzfahrzeuge werden alle Kraftfahrzeuge und Geländefahrzeuge (Off-Road, Baustellenfahrzeuge) bezeichnet, die zur gewerblichen Beförderung von Personen (Fahrgästen), Gütern und/oder zum Ziehen von Anhängern bestimmt sind. Dazu gehören Kraftomnibusse für den Personentransport und Lastkraftwagen sowie Sattelzugmaschinen für den Gütertransport. [52] Nutzfahrzeuge zur Güterbeförderung werden nach der zulässigen Gesamtmasse in drei EG-Fahrzeugklassen eingeteilt:

- N1: bis 3,5 Tonnen
- N2: über 3,5 Tonnen bis 12 Tonnen
- N3: über 12 Tonnen (bis 40 bzw. 44 Tonnen im kombinierten Verkehr)

Zusätzlich wird zwischen verschiedenen Aufbauarten unterschieden: klassisch, zweckgebunden (wie gepanzerte/Militärfahrzeuge) und kombiniert (Schwerlastfahrzeuge), sowie verschiedenen Betriebsarten (Solo- und Zugbetrieb). Die Anhängerfahrzeuge im Zugbetrieb werden nach der zulässigen Fahrzeuggesamtmasse in die vier EG-Fahrzeugklassen eingeteilt:

- O1: bis zu 0,75 Tonnen
- O2: 0,75 Tonnen bis 3,5 Tonnen
- O3: 3,5 Tonnen bis 1 Tonnen
- O4: über 10 Tonnen

Lkw mit Anhängerfahrzeugen, also einer zusätzlichen Ladefläche, werden als Gliederzug bezeichnet. Unter Zugmaschinen im On-Road Einsatz handelt es sich in der Regel um Sattelzugmaschinen. In der Kombination mit einem Sattelauflieger werden diese als Sattelzug bezeichnet. [53] Land- und forstwirtschaftliche sowie

sonstige (z.B. militärische) Zugmaschinen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet, da sie üblicherweise nicht im ökologischen Bilanzierungsrahmen des Verkehrssektor inbegriffen sind [29].

Gemäß der Straßenverkehrszulassungsordnung (StVZO) Richtlinie 96/53EG erfolgt eine weitere Differenzierung der zulässige Fahrzeuggesamtmassen in Abhängigkeit von Achskonfiguration (Anzahl der Achsen und maximale Achslast bzw. Nutzlast) und den Fahrzeugabmessungen. Neben den technischen Komponenten wird auch die fahrerlaubnisrechtliche Komponente zur betriebswirtschaftlichen Differenzierung zwischen verschiedenen Nutzfahrzeugtypen herangezogen. Tabelle 2 fasst somit die wesentlichen Strukturierungsmerkmale für Nutzfahrzeuge mit typischen Aufbauarten für die Güterbeförderung zusammen. Lkw im Gliederzugbetrieb werden hier nicht als separate Nutzfahrzeugtypen differenziert. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit resultieren daraus sechs Nutzfahrzeugtypen, die in ihrer Bezeichnung nach dem maximal zulässigen Gesamtgewicht und des Fahrzeugtyps benannt werden.

Tabelle 2: Klassifizierung Nutzfahrzeuge (klassischen Aufbauarten) für die Güterbeförderung

Bezeichnung für diese Arbeit	Fahrzeug-klasse (mit zul Gesamt-gewicht)	Fahrzeugtyp	Typischer Aufbautyp	Betriebs-art	Achs-konfiguration	Max. zulässiges Gesamt-gewicht [Tonne]	Max. zulässige Zuladung [Tonnen]	Fahrzeug-maße HxBxL [Meter]	EU Führer-schein-Klasse
3,5t Transporter	N1 (bis 3,5 t)	Transporter	Kastenaufbau, Pritschenaufbau	Solo	2-Achsen	3,5	1,4	4x2,55x6	B
7,5t Lkw	N2 (3,51 bis 12t)	leichte Lastkraftwagen	Pritschenaufbau	Solo	2-Achsen	7,5	3	4x2,55x12	C1
12t Lkw		mittelschwere Lastkraftwagen	Pritschenaufbau	Solo	2-Achsen	12	7	4x2,55x12	C
18t Lkw	N3 (ab 12,1 t)	Schwere Lastkraftwagen	Wechselaufbau	Solo	2-Achsen	18	10	4x2,55x12	C
26t Lkw		Schwere Lastkraftwagen	Pritschenaufbau	Solo	3-Achsen	26	12	4x2,55x12	C
40t Szm		Sattelzugwagen	Standard-Sattelanhänger (Kastenaufbau)	Zug	2-Achsen	40	25 (27)	4x2,55x16,50	CE
	O4 (ab 10,1 t)	Anhängerwagen			3-Achsen				

Quellen: **Eigene Auswertung basierend auf** [53–56], Abmessungen und Gewicht nach EU-Richtlinie 96/53/EG.

2.2 Beschreibung der Fahrzeugmarktanteile und -entwicklungen

Für die fahrzeugsegmentspezifische Marktunterteilung werden die Nutzfahrzeugtypen entsprechend der Klassifikation in Tabelle 2 den folgenden Marktsegmenten zugeordnet:

- 3,5t Transporter: alle Nutzfahrzeuge bis 3,5t zGG
- 7,5t Lkw: Lkw über 3,5t bis 7,5t zGG
- 12t Lkw: Lkw über 7,5t bis 12t zGG
- 18t Lkw: Lkw über 12t bis 18t zGG
- 26t Lkw: Lkw über 18t zGG
- 40t Szm: alle Sattelzugmaschinen

Die sechs Einzelsegmente ergeben in der Summe den gesamten Nutzfahrzeugmarkt wieder. Für die Berechnung des zukünftigen Nutzfahrzeugbestandes müssen die Strukturen des Altbestandes und die Entwicklung der segmentspezifischen Neuzulassungszahlen auf empirischer Basis charakterisiert werden. Die hierfür erforderlichen Marktdaten basieren auf einer Sonderauswertung des Bestandsregisters des Kraftfahrt-Bundesamts zu den jährlichen Nutzfahrzeugbeständen in Deutschland für die Erhebungsjahre 2010 bis 2020 differenziert nach zulässigem Gesamtgewicht und Registrierungsjahr der Fahrzeuge.

2.2.1 Neuzulassungsstrukturen

Abbildung 3 zeigt die Entwicklung der jährlichen Neuzulassungen von Nutzfahrzeug in Deutschland nach Segmenten abgebildet. Im Jahr 2020 (Stichtag 31.12) wurden 321.112 Nutzfahrzeuge registriert. Dies entspricht 9% der gesamten Kraftfahrzeug-Neuzulassungen in Deutschland [57]. Die Entwicklung zeigt, dass der Neufahrzeugmarkt sensibel auf gesamtwirtschaftliche Schwankungen reagiert. Dennoch steigt die Zahl der Neuzulassungen zwischen 2010 und 2020 um 27%, während der gesamte Kraftfahrzeug-Neuzulassungen in Deutschland nur um 5% anstieg [57]. Mit einem Marktanteil von 78% dominieren die 3,5t Transporter. Im Vergleich dazu ist das Marktvolumen der 7,5t Lkw mit 4% sehr gering. Dies kann mit der Notwendigkeit einer höheren Führerscheinklasse bei vergleichsweise geringen Nutzlastvorteilen begründet werden (siehe auch Tabelle 2) [58]. Das Marktvolumen der 12t Lkw ist wie der 7,5t Lkw leicht rückläufig. Ein nahliegende Erklärung hierfür ist, dass durch die Ausweitung der Mautpflicht auf Lkw ab 7,5t zGG im Jahr 2015 die bisherigen Kostenvorteile für 12t Lkw reduziert wurden [58]. Im N3 Segment dominieren die 40t Szm die Zulassungen, mit einem Marktanteil von 13% im Jahr 2020. Eine umfassende Trenduntersuchung der Neuzulassungen differenziert nach Fahrzeugsegment ist im Anhang in Abbildung 51 dargestellt. Bei den Neuzulassungen dominiert in allen Fahrzeugsegmenten der Dieselmotor der Abgasstufe Euro VI (95% Marktanteil in 2020), insbesondere bei den 40t Szm (fast 100% in 2020). Bei den alternativen Antriebstechnologien dominieren batterie-elektrischen leichten Nutzfahrzeuge.

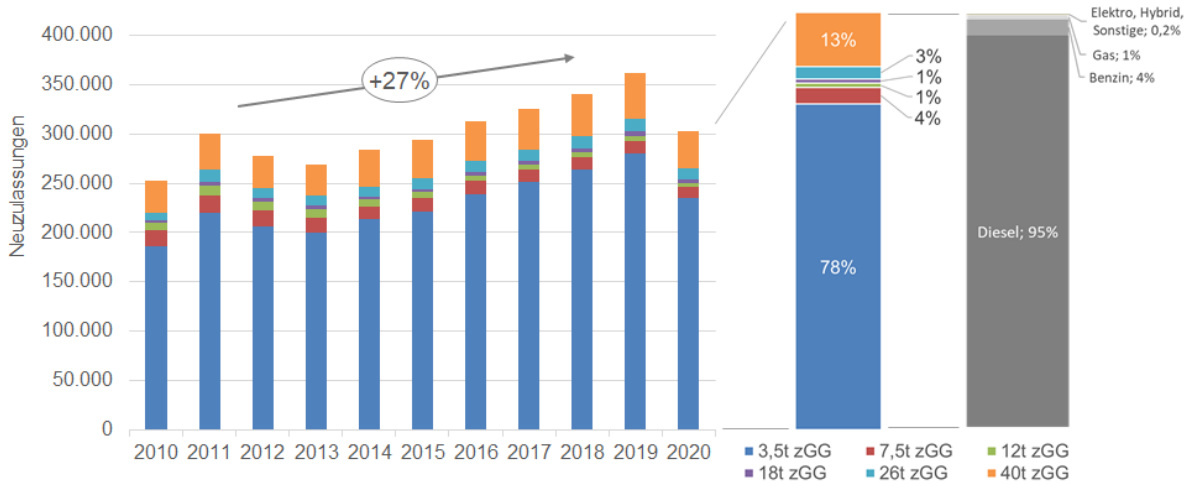


Abbildung 3: Entwicklung der jährlichen Neuzulassungen im deutschen Straßengüterkraftverkehr nach Fahrzeugsegmenten (eigene Auswertung in Anlehnung an [59])

2.2.2 Bestandsstrukturen

Abbildung 4 zeigt die Entwicklung des jährlichen Nutzfahrzeugbestandes nach Segmenten visualisiert. Im Jahr 2020 (Stichtag 01.01) werden 3.493.807 Nutzfahrzeuge im Bestand gezählt. Im Vergleich zu den anderen Fahrzeugbeständen in Deutschland ist der Nutzfahrzeugbestand stärker gewachsen (+37% Nfz und +13% gesamt Kfz insgesamt zwischen 2010 und 2020) [57]. Dies ist vor allem auf ein starkes Wachstum der 3,5t Transporter und 40t Szm Bestände zurückzuführen. Dagegen nehmen die Bestände der 7,5t und 12t Lkw im betrachteten Zeitraum ab. Die Bestände der 18t und 26t Lkw sind vergleichsweise gering und zeigen eine uneinheitliche Entwicklung zwischen 2010 und 2020.

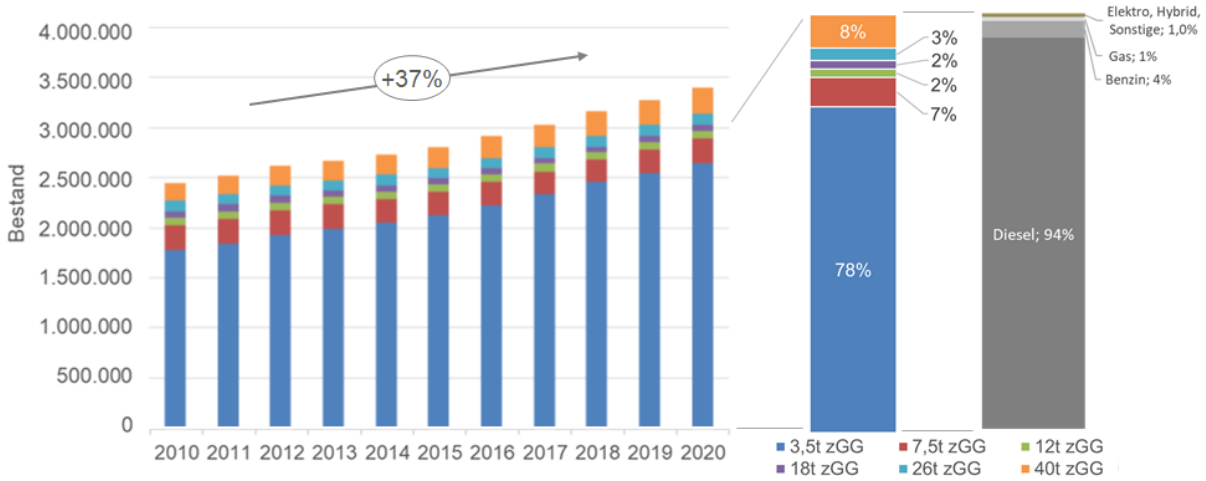


Abbildung 4: Entwicklung des jährlichen Fahrzeugbestands im deutschen Straßengüterkraftverkehr nach Fahrzeugsegmenten (eigene Auswertung in Anlehnung an [57])

Abbildung 5 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Nutzfahrzeuge im Bestand nach ihrem Bestandsalter dargestellt. Der hohe Anteil der Neuzulassungen am Bestand von bis zu 17 Prozent je Segment kennzeichnet die schnelle Flottenerneuerung im Straßengüterkraftverkehr. Seit der Einführung im Jahr 2013 dominiert der Euro VI Diesel im Bestand[2]. Charakteristisch im Verlauf ist die Abnahme des Bestandsanteils mit zunehmendem Alter, gekennzeichnet durch leicht abflachende Kurvenverläufe bis hin zu gestreckten S-Kurven. Die Gründe für das Ausscheiden aus dem Bestand mit höherem Fahrzeugalter können aus der Statistik nicht direkt entnommen werden. Auf Basis der Altersverteilung des Altbestandes wurden für zukünftige Fahrzeuge Wahrscheinlichkeitsraten für das Ausscheiden aus dem Bestand, sogenannte Sterberaten, berechnet (siehe Kapitel 6.2.2).

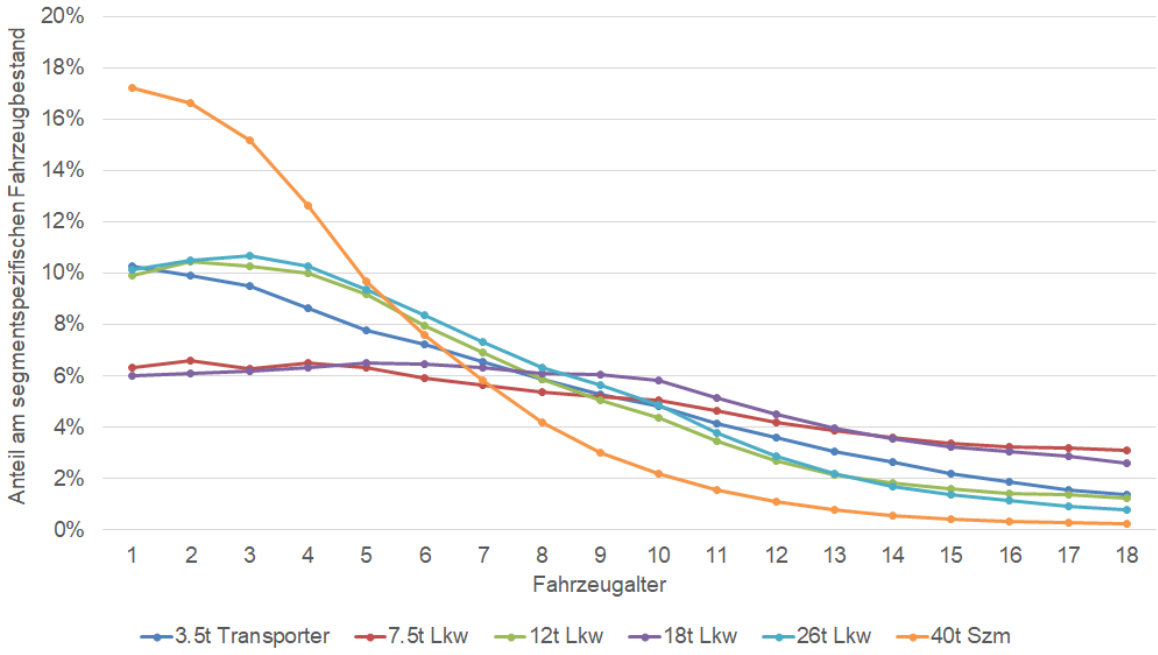


Abbildung 5: Altersverteilung des Nutzfahrzeugbestandes für einzelne Fahrzeugsegmente (eigene Darstellung in Anlehnung an [59])

2.2.3 Außerbetriebssetzungen

Die jährlich Außerbetriebsetzungen von Nutzfahrzeugen (Stichtag: 31.12) ergeben sich aus der jährlichen Bestandsveränderung (Stichtag: 01.01) abzüglich der im gleichen Jahr neuzugelassenen Nutzfahrzeuge (Stichtag: 31.12). Bis zum 31.12.2020

[2] Anteil Diesel EURO6 nach einzelnen Beständen im Jahr 2020: 3,5t Transporter: 50%, 7,5t Lkw: 60%, 12t Lkw :56%, 18t & 26t Lkw[2]: 74%, 40t Szm: 86%

werden in Deutschland 254.689 Nutzfahrzeuge außer Betrieb gesetzt. Hierzu zählen grundsätzlich die Verschrottung (technisch bedingt oder aufgrund Verkehrsunfälle), die Ausfuhr ins Ausland oder die Nutzung ausschließlich auf nicht öffentlichem Gelände [57]. Besitzerumschreibungen werden hier ausführlich nicht berücksichtigt, da diese beim Kraftfahrtbundesamt (KBA) separat berichtet werden. Im Anhang in Abbildung 52 ist die Häufigkeitsverteilung der außer Betrieb gesetzten Nutzfahrzeuge in Abhängigkeit von ihrem Alter dargestellt. Auffällig ist die Zunahme der Außerbetriebssetzungen in den ersten Fahrzeugjahren (bis ca. 5 Jahre). Diese unerwartete Verteilung kann damit erklärt werden, dass es sich hierbei vor allem um vorübergehende Außerbetriebssetzungen handeln könnte, da das KBA in den jährlichen Erhebungen ab 2008 nicht zwischen vorübergehenden und endgültigen Außerbetriebsetzung unterscheidet [57]. Der Vergleich der Altersstrukturen der Außerbetriebsetzung zwischen den Jahren 2007 und 2008 zeigt deutlich den Anstieg der frühen Außerbetriebsetzung im Berichtsjahr 2008 (können aus den historischen KBA-Statistik entnommen werden [57]). Für die Ableitung der endgültigen Außerbetriebsetzungen wird daher angenommen, die Außerbetriebssetzungszahlen ab dem 5. Fahrzeugalter in der Häufigkeitsverteilung zu berücksichtigen. Auf diese Weise wird, wie in Abbildung 6 dargestellt, das arithmetische Mittel der Außerbetriebssetzungsalter auf Basis der endgültigen Außerbetriebssetzungszahlen abgeleitet worden. Der Vergleich mit dem Durchschnittsalter auf Basis der Bestandsverteilung (siehe Abbildung 6) zeigt deutliche Unterschiede zwischen den Kenngrößen.

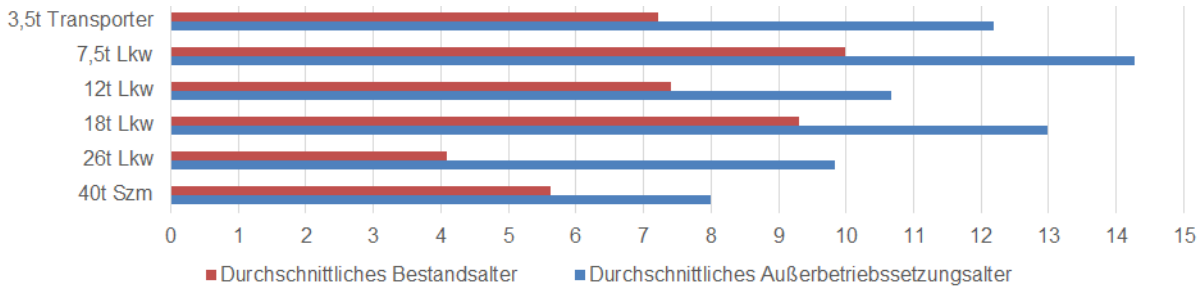


Abbildung 6: Durchschnittliches Bestandsalter und bereinigte Außerbetriebssetzungsalter nach Fahrzeugsegment (eigene Darstellung in Anlehnung an [59])

2.3 Beschreibung der Fahrleistungszusammensetzung und -entwicklung

Die Fahrleistung der in Deutschland registrierten Fahrzeuge wird als Inländerfahrleistung bezeichnet. Die Inlandsfahrleistung hingegen zählt die zurückgelegte Entfernung auf dem Gebiert der Bundesrepublik Deutschland, unabhängig vom Registrierungsland der Fahrzeuge [60]. Für die Bilanzierung der THG-Emissionen des Verkehrssektors in Deutschland ist die Inlandsfahrleistung

maßgeblich [29]. Daher ist für die Berechnung der verkehrsbedingten Energie und CO_2-Emissionen im Rahmen dieser Arbeit die Inlandsfahrleistung des Straßengüterkraftverkehrs zu charakterisieren. Für die Simulation des Absatzmarktes (Neufahrzeugmarkt) auf Basis der Kundenspezifikationen deutscher Nutzfahrzeuge ist die spezifischen Inländerfahrleistung relevant. Für die Modellierung des Gesamtsystems ergibt sich daraus die Herausforderung die einzelnen Fahrleistungsgrößen konsistent zueinander zu beschreiben. Im Folgenden werden die Zusammensetzung der fahrzeugsegment- und meldelandspezifische Inlandsfahrleistung sowie die Entwicklung der spezifischen Inländer-Jahresfahrleistung über die Fahrzeuglebensdauer charakterisiert. Anschließend erfolgt eine Einordnung der spezifischen Jahresfahrleistung nach Einsatzbereichen statt.

2.3.1 Inlandsfahrleistung der deutschen und ausländischen Nutzfahrzeuge

Grundsätzlich wird die jährliche Inlandsfahrleistung aus der Fahrleistung der in Deutschland (Inländer) und der im Ausland zugelassenen Nutzfahrzeuge jeweils innerhalb Deutschlands berechnet. Für die Inlandsfahrleistung der deutschen Nutzfahrzeuge werden die Daten aus dem „Verkehr deutscher Lkw – Inlandsverkehr“ [49] zugrunde gelegt. Für die Inlandsfahrleistung der ausländischen Nutzfahrzeuge werden die Daten aus dem „Verkehr europäischer Lkw – Inlandsverkehr“ [50] verwendet. Beide Datensätze werden durch Stichprobenbefragungen gewonnen und monatlich hochgerechnet. Für die Erfassung der durchgeführten Fahrten deutscher Nutzfahrzeuge ist das Kraftfahrt-Bundesamt zuständig. Die Einzeldaten der ausländischen Nutzfahrzeuge werden vom jeweiligen Meldestaat erhoben und in dem europäischen Datenpool „Eurostat“ zusammengeführt. In beiden Erhebungen werden jedoch nur Lastkraftwagen über 3,5t Nutzlast und Sattelzugmaschinen berücksichtigt [49, 50]. Die fehlenden Fahrleistungsdaten für das Segment der 3,5t Transporter werden auf Basis der Inländerfahrleistung aus dem „Verkehr in Kilometer – Verkehrsaufkommen“ definiert [61]. Hinweise auf den Saldo zwischen Inlands- und Inländerfahrleistung bei den 3,5t Transporter liefert die letzte Fahrleistungserhebung (FLE) im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt) für das Jahr 2014. Diese beinhaltet die stichprobenartige Erfassung der Inländerfahrleistung und weist den Anteil der Auslandsfahrten an der Gesamtfahrleistung der deutschen Kraftfahrzeuge separat aus [60]. Bei den leichten Nutzfahrzeugen ist der Anteil der Auslandsfahrten mit 1,2% an der Jahresfahrleistung vernachlässigbar gering (siehe Tabelle 40 im Anhang). Daher wird für die Zusammenstellung des Inlandsfahrleistungsgerüsts die Inländerfahrleistung der leichten Nutzfahrzeuge verwendet. Abbildung 7 zeigt die fahrzeugsegmentspezifische Aufteilung der Inlandsfahrleistung des Straßengüterkraftverkehrs dargestellt. Die Fahrleistung der leichten Nutzfahrzeuge

dominiert (53,03 Mrd. km) und weist zwischen 2010 und 2020 auf eine hohe Wachstumsrate.

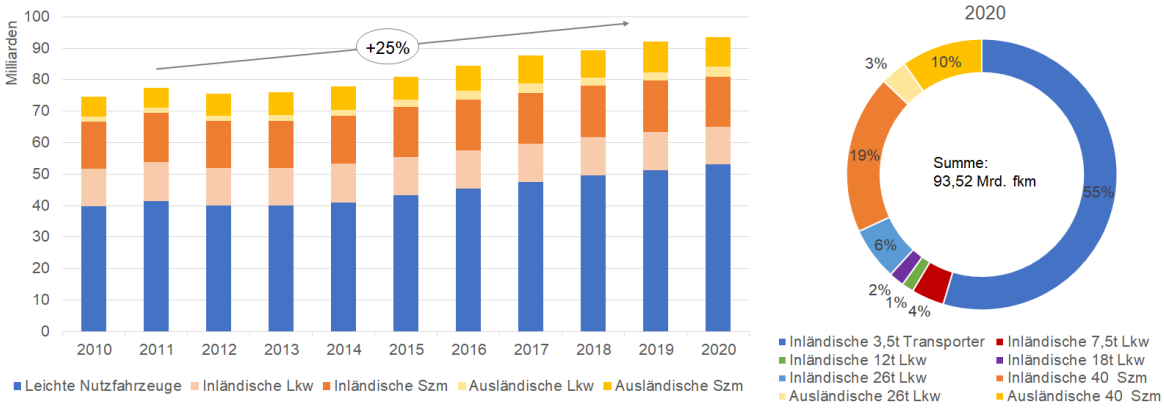


Abbildung 7: Entwicklung der Inlandsfahrleistung (in FzKm) des Straßengüterkraftverkehrs (in Anlehnung an [49, 50, 61])

Bei Nutzfahrzeugen über 3,5 t zGG steigt der Fahrleistungsanteil ausländischer Nutzfahrzeuge von 23% im Jahr 2010 auf 31% im Jahr 2020. Ein Großteil der ausländischen Nutzfahrzeuge in Deutschland sind Sattelzugmaschinen, die überwiegend in osteuropäischen Ländern registriert sind. So entfallen allein auf polnische Nutzfahrzeuge ca. 17% der mautpflichtigen Fahrleistung (=Inlandsfahrleistung der schweren Nutzfahrzeuge über 7,5t. zGG). Diese Entwicklung wird insbesondere mit den vergleichsweise niedrigen Fahrerlöhnen begründet [62]. Darüber hinaus sind auf deutschen Straßen auch Nutzfahrzeuge aus Nachbarländern wie den Niederlanden und Österreich (beide zusammen ca. 4% der Inlandsfahrleistung) unterwegs (siehe Abbildung 8 links). Auffällig ist auch das höhere Durchschnittsalter der polnischen Nutzfahrzeugflotte (siehe Abbildung 8 rechts). Es ist daher von einer langsameren technologischen Erneuerung der polnischen Nutzfahrzeugflotte im Vergleich zu den westeuropäischen Nutzfahrzeugbeständen auszugehen (näheres hierzu in der Szenarioanalyse in Kapitel 7).

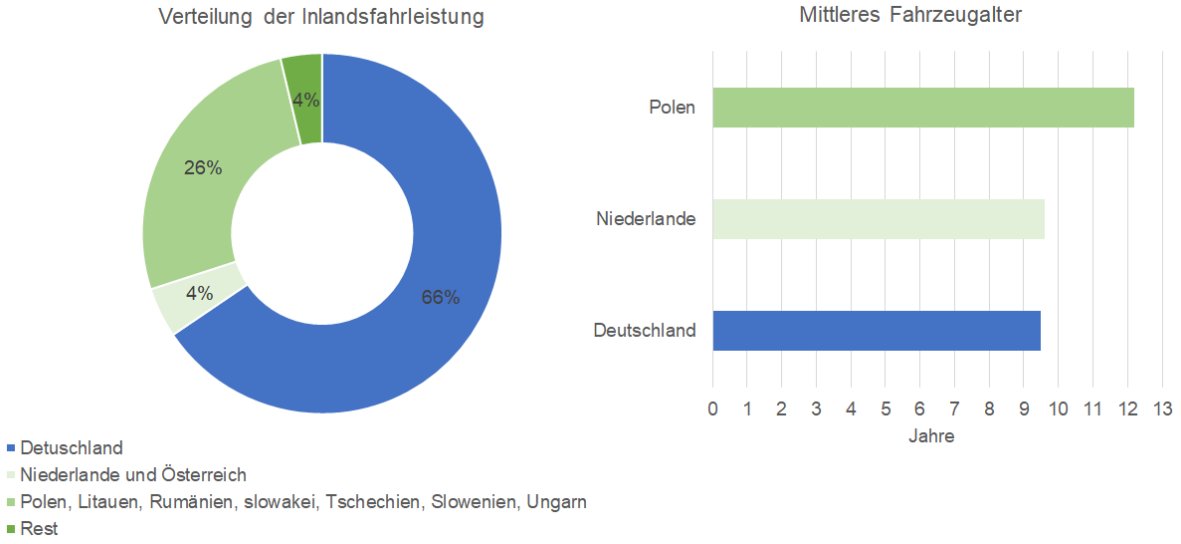


Abbildung 8: Charakteristiken der schweren Nutzfahrzeuge (ab 3,5t zGG) nach Heimatsländern in Deutschland im Jahr 2020; Verteilung ihrer Inlandsfahrleistung (links); ihres durchschnittlichen Fahrzeugalters (rechts) (eigene Darstellung in Anlehnung an [50, 63])

2.3.2 Jahresfahrleistung der deutschen Nutzfahrzeuge

Für die Modellierung des Neufahrzeugmarktes müssen die spezifischen Jahresfahrleistungen der deutschen Nutzfahrzeuge quantifiziert werden. Die hierfür erforderlichen Daten zur Inländerfahrleistung liegen zum einen in der letzten Fahrleistungserhebung (FLE) im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt) für das Jahr 2014 und zum anderen in jährlicher Aktualität in der Statistik „Verkehr in Kilometern“ (VK) des Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) vor. Die BaSt-FLE enthält die Daten zur Inländerfahrleistung nach zulässigem Fahrzeuggesamtgewicht und Fahrzeugalter in einer feineren Auflösung als die im KBA-VK. Auf Basis der BaSt-FLE aus dem Jahr 2014 ist in Abbildung 9 die empirische Altersverteilung der fahrzeugsegmentspezifischen Inländerfahrleistung dargestellt. Innerhalb der ersten drei Jahre erreichen die Nutzfahrzeuge ihre maximale Jahresfahrleistung (siehe auch Tabelle 3). Deutlich erkennbar ist auch die Degression der mittleren Jahresfahrleistung der im Bestand verbleibenden Nutzfahrzeuge mit zunehmenden Fahrzeugalter. Die Verläufe lassen sich näherungsweise durch lineare Degressionsgleichungen abbilden (siehe auch Abbildung 53 im Anhang). Dabei unterscheiden sich die Reduktionsgeschwindigkeit für die einzelnen Nutzfahrzeugsegmente. Vereinfachend lassen sich segmentspezifische Fahrleistung-Regressionsraten ableiten, die in Tabelle 3 gelistet sind. Der Ansatz der linearen Fahrleistungsdegression wird auch in Analysen zum Personenkraftwagenbestand aus der Literatur verfolgt, z.B. in [64].

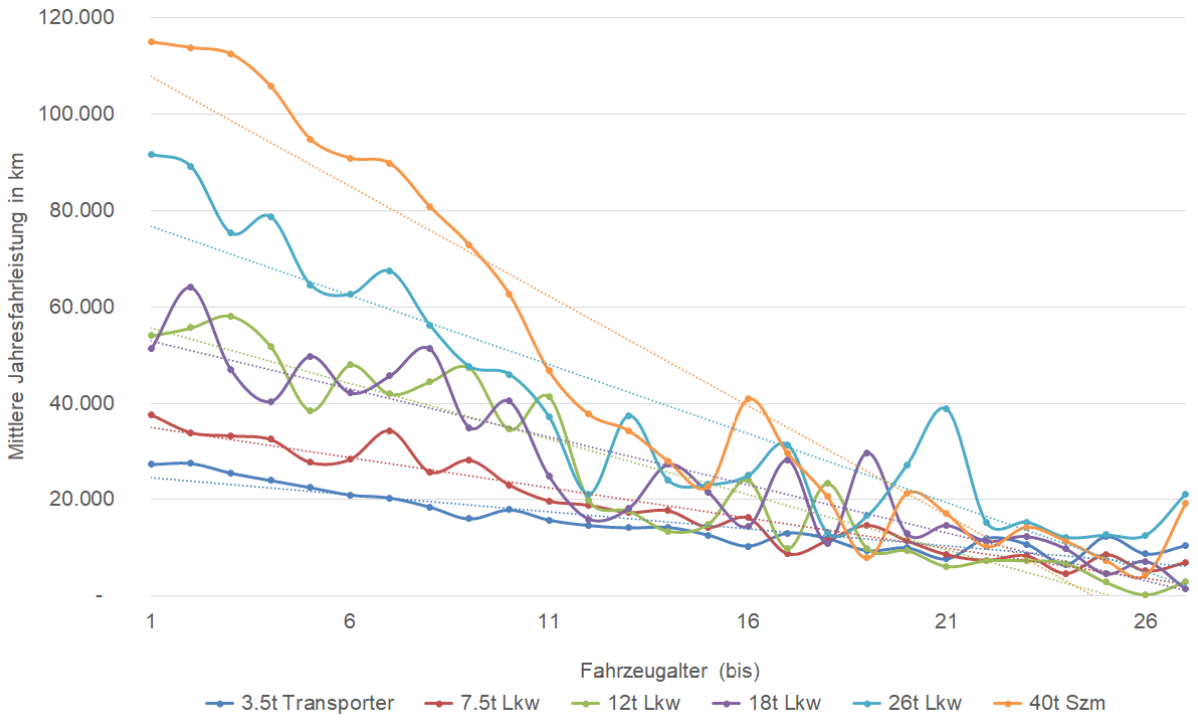


Abbildung 9: Häufigkeitsverteilung der Jahresfahrleistung für einzelne Fahrzeugsegmente in Abhängigkeit ihres Fahrzeugalters (eigene Darstellung in Anlehnung an [60])

Für die Kalibrierung der ermittelten Häufigkeitsverteilung der Jahresfahrleistung auf das Jahr 2020 werden die Datensätze aus dem „Verkehr in Kilometern – Inländerfahrleistung 2020“ verwendet. Zunächst zeigt der Vergleich zwischen KBA-VK und BaSt-FLE eine hinreichend genaue Übereinstimmung mit den mittleren Jahresfahrleistungswerten (0-3 Jahre) für das Jahr 2014 (siehe Tabelle 3). Aus der Datenreihe des KBA-VK wird ersichtlich, dass die mittlere Jahresfahrleistung im Jahr 2020 in alle Segmente, insbesondere in den schweren Fahrzeugsegmenten abgenommen hat (siehe in Tabelle 3, Spalten mittlere Jahresfahrleistung nach KBA-VK). Die Häufigkeitsverteilung der Jahresfahrleistung auf Basis der BaSt-FLE wird daher an die Fahrleistungsdaten des „Verkehr in Kilometer“ im Jahr 2020 kalibriert[3].

[3] Die Veränderung der Jahresfahrleistung der Lkw-Segmente über 7,5t zGG lassen sich nicht segmentspezifisch differenzieren. Da die betrachtete Segmentierung in der VK nicht existiert, wird das Saldo 2014-2020 (minus 10.000 km) auf die Verteilung im FLE 2014 verwendet.

Tabelle 3: Fahrzeugsegmentspezifische mittlere Jahresfahrleistung

Nutzfahrzeug-segment	Mittlere Jahresfahrleistung nach KBA-VK		Mittlere Jahresfahrleistung nach BaSt-FLE		Segment-spezifische Fahrleistungs-Regressionsrate
	0-3 Jahre (2020)	0-3 Jahre (2014)	0-3 Jahre (2014)	Max. (2014)	
3,5t Transporter	23.923 km	25.592km	26.839 km	27.368 km (2. Jahr)	0,035
7,5t Lkw	22.399 km	27.476km	34.951 km	37.648 km (1. Jahr)	0,035
12t Lkw	43.664 km	52.544 km	55.930 km	58.110 km (3. Jahr)	0,05
18t Lkw			54.103 km	64.013 km (2. Jahr)	0,05
26t Lkw			85.360 km	91.677 km (1. Jahr)	0,08
40t Szm	96.850 km	115.017 km	113.757 km	114.975 km (1. Jahr)	0,10
Quelle: [60, 61]					

Jahresfahrleistung nach Einsatzbereichen

Neben der segment- und altersspezifischen Differenzierung der Jahresfahrleistung, ist für die technologische Marktmodellierung eine Unterscheidung nach spezifischen Einsatzbereichen von Nutzfahrzeugen vorteilhaft. Das KBA unterscheidet in Abhängigkeit der Einzelstrecken-Entfernungsstufen zwischen dem Nahbereich (bis 50km), dem Regionalbereich (51-150km) und dem Fernbereich (ab 151km) [53]. Die Häufigkeitsverteilung der fahrzeugsegmentspezifischen Tages- und Jahresfahrleistung in Nah-, Regional und Fernbereich des gewerblichen Güterverkehrs wurde bereits im Rahmen der Dissertation von F. Kleiner [11] mit der gleichen Fahrzeugsegmentierung wie in dieser Arbeit ausgewertet. Aus den ermittelten Absolutwerten der Jahresfahrleistung für den Straßengüterkraftverkehr und der einsatzspezifischen Häufigkeitsverteilung nach [11] lässt sich daher die Verteilung der Jahresfahrleistung nach Einsatzbereich und Fahrzeugsegment ableiten, siehe Abbildung 10.

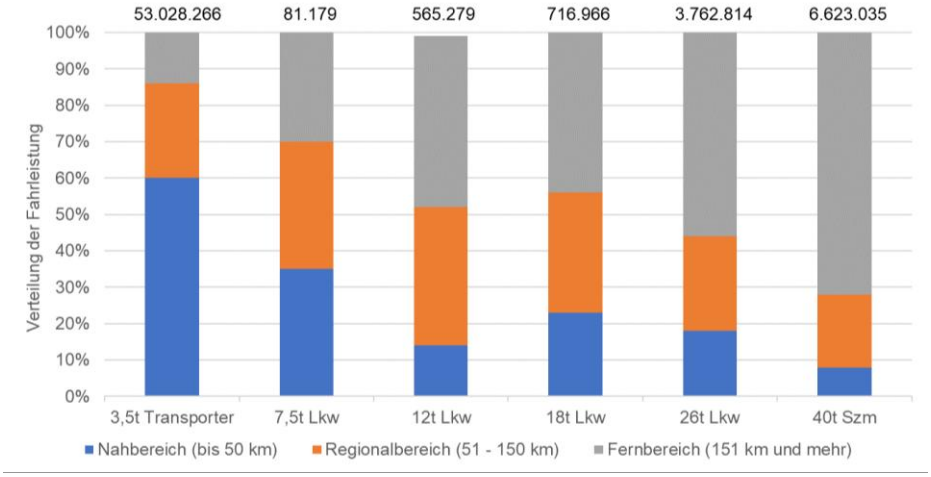


Abbildung 10: Segmentspezifische Verteilung der Fahrleistung nach Einsatzbereiche mit Angabe der absoluten Fahrleistung in 1.000 km (eigene Darstellung in Anlehnung an [61])

Die abgeleiteten Markt- und Fahrleistungsgrößen bieten somit eine konsistente Datenbasis für die differenzierte Modellierung von Technologiediffusionspfaden nach Fahrzeugsegment und Fahrzeugalter, Jahresfahrleistung und Einsatzbereich.

2.4 Ermittlung und Strukturierung kaufentscheidender Kriterien

Die mikroökonomische Entscheidungstheorie befasst sich mit der Entscheidungsfindung aus einer diskreten, d.h. begrenzten Auswahl möglicher Alternativen. Die Theorie kann entweder durch einen normativen Ansatz erklärt werden, der beschreibt, wie Entscheidungen im Hinblick auf ein Ziel getroffen werden sollten, oder durch einen deskriptiven Ansatz, der darlegt, wie Entscheidungen in der Realität getroffen werden. Der deskriptive Ansatz unterscheidet zwischen zwei Methoden zur Messung von Auswahlwahrscheinlichkeiten anhand spezifischer Kriterien: Die Revealed Preference Methode, die auf tatsächlichen Entscheidungen z.B. auf Basis einer Marktanalyse basiert, oder die Stated Preference Methode, die auf empirischen Befragungen basiert. [65]

Um den Einfluss relevanter Kaufkriterien auf die Auswahlwahrscheinlichkeit für neuartige Nutzfahrzeugkonzepte ohne Entscheidungshistorie, aber dennoch auf Basis derzeitiger Verhaltensmuster realitätsnah abzubilden, werden zwei empirischen Befragungen nach der Stated Preference Methode zugrunde gelegt. Die im Rahmen der Studie [66] durchgeführte repräsentative[4] Nutzerbefragung in der Logistikbranche

[4] Befragt wurden 250 Unternehmen in Deutschland. Anhand des Vergleichs der Teilnehmerstrukturen der Befragung mit den anderen Befragungen in der Logistikbranche wird ein Indiz für die Repräsentanz dargestellt. Allerdings wurden Unternehmen hauptsächlich zu SNF befragt.

in Deutschland im Jahr 2021 liefert relevante Kaufkriterien für die Neuanschaffung von Nutzfahrzeugen mit alternativen Kraftstoffen und Antriebskonzepten. Ergänzend wurde eine eigenständige explorative Befragung[5] unter deutscher Logistikern im Jahr 2021 zur Kaufentscheidung von Fahrautomatisierungssysteme durchgeführt, die in [67] näher beschrieben ist. Ein wesentliches Motiv für die Durchführung der eigenständigen Befragung war die Einordnung des Kriteriums „Steigerung der Fahrzeugsicherheit“ in den Auswahlprozess für Nutzfahrzeuge, die mit einer Conjoint-Analyse, daher um die Präferenzen der Käufer näher zu analysieren, ergänzt wurde.

In Abbildung 11 sind die relevanten Kaufkriterien, einerseits für den Umstieg auf alternative Kraftstoffe und Antriebskonzepte und andererseits für den Umstieg auf Fahrautomatisierungssysteme, jeweils nach ihrer Relevanzreihenfolge auf Basis der beiden Befragungen dargestellt.

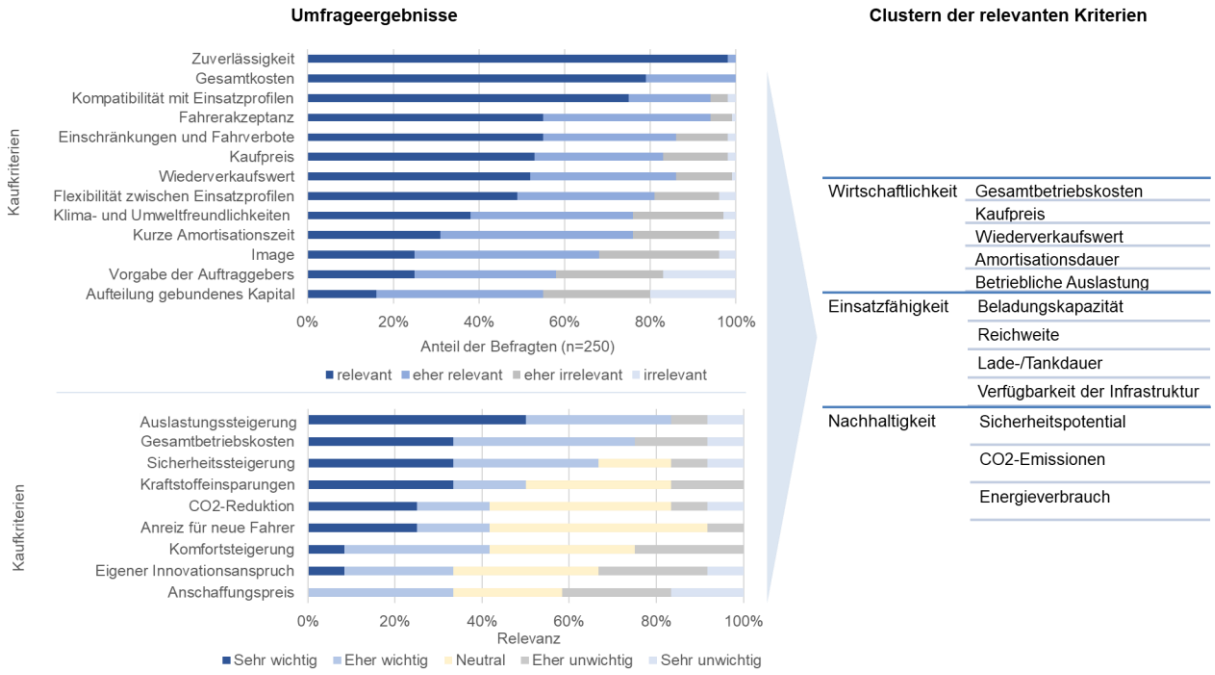


Abbildung 11: Relevante Lkw-Kaufkriterien für den Umstieg auf alternative Kraftstoffe und Antriebskonzepte (Links oben) sowie Fahrautomatisierungssysteme (links unten) (eigene Darstellung in Anlehnung an [66, 67])

Für eine diskrete Entscheidungsmodellierung liegt der Fokus auf quantifizierbaren Kriterien, die durch Eigenschaften der Fahrzeuge und der Energieinfrastruktur beschrieben werden können. Unter Berücksichtigung der Interdependenzen zwischen

[5] Die Befragung teilt sich in einer Vor- und in eine Hauptstudie. In der Vorstudie wurden Interviews mit Experten aus der Logistikbranche durchgeführt. In der Hauptstudie wurde eine explorative Befragung erhoben, die statistisch ausgewertet worden ist.

den einzelnen Kriterien lassen sich drei Cluster von Kriterien zusammenfassen, die die Wirtschaftlichkeit, die Einsatzfähigkeit und die Nachhaltigkeit von Nutzfahrzeugen definieren.

Verschiedene **ökonomische Kriterien** kennzeichnen die **Wirtschaftlichkeit** der betrachteten Nutzfahrzeugkonzepte. In der Gesamtheit werden diese durch die Gesamtbetriebskosten (Total Cost of Ownership, TCO) zusammengefasst. Die technische Zuverlässigkeit der Fahrzeuge spielt insbesondere im Transportbereich eine wesentliche Rolle, weshalb sie an erste Stelle in der Relevanzreihenfolge der Kaufkriterien steht. Dieser wird an der Robustheit und Langlebigkeit der Fahrzeugkomponenten sowie an der Wartungsfreundlichkeit der Fahrzeugsysteme gemessen, welche wiederum die Wartungs- und Reparaturkosten beeinflussen, die einen Teil der Gesamtbetriebskosten darstellen. Zusätzlich bestehen Anforderungen an die Höhe der Anschaffungskosten und Amortisationsdauer. Die Amortisationsdauer dient in der Regel als Indikator für die Kapitalbindung und daraus resultierende Liquiditätsrisiko für den Flottenbetreiber. Die Anforderungen an die Amortisationsdauer ergeben sich dabei nicht nur aus dem vorgesehenen Einsatzprofil des Fahrzeugs, sondern sind auch maßgeblich vom Unternehmensprofil abhängig, insbesondere von der verfügbaren Kapitaldecke und der Flottengröße. Kleinere Flottenbetreiber reagieren in der Regel sensibler auf eine hohe Kapitalbindung als große Logistikunternehmen [66].

In der explorativen Befragung in [67] sowie auch in der Studie [68] wurde einer hohen betrieblichen Auslastung der Ressource „Nutzfahrzeug“ die höchste Bedeutung beigemessen. Durch eine Auslastungssteigerung können unter bestimmten Voraussetzungen höhere Kosteneffizienz und damit günstigere Transporte erzielt werden. Es lassen sich hierbei verschiedene Dimensionen der Auslastung unterscheiden: zeitliche, entfernungsbezogene, gewichts- und volumenbezogene Auslastung [69]. Der Einsatz vollautomatisierter und autonomer Nutzfahrzeuge ermöglicht eine potenziell höhere Auslastung insbesondere des zeitlichen Einsatzes der Fahrzeuge, da Lenkzeiten entfallen. Ob sich diese höhere zeitliche Verfügbarkeit jedoch in Kostenvorteile übersetzt, hängt wesentlich von der vorgesehenen Transportaufgabe ab. Eine entfernungs-, gewichts- und volumenbezogene Auslastung erfordert hingegen auch eine logistische bzw. auftragsbasierte Anpassung der Transportaufgabe, welche im Kontext der vergleichenden Bewertung verschiedener Nutzfahrzeugkonzepte anhand gleicher Transportaufgaben nicht Gegenstand der Betrachtung dieser Arbeit ist. Daher wird die zeitliche Auslastung als geeignete Bewertungsgröße zur Differenzierung der technologiebedingten Einflüsse im weiteren Verlauf, in Kapitel 5, näher betrachtet.

Die **technischen Kriterien** spielen eine entscheidende Rolle bei der Bewertung der **Einsatzfähigkeit** der Nutzfahrzeuge. Die Kompatibilität der Fahrzeuge inklusiver der Energieinfrastruktur mit dem Einsatzprofil ist essentiell und erfordert die Kenntnis der einsatzspezifischen Anforderungen für den Transport. Diese beziehen sich auf die Beladungskapazität, die Reichweite sowie die Lade- bzw. Tankzeit der Nutzfahrzeuge sowie der Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit der Energieinfrastruktur. In Bezug auf die Relevanzreihenfolge in Abbildung 11 ist ersichtlich, dass die Gesamtkosten für die Kaufentscheidung von höheren Bedeutung scheinen als die Kompatibilität mit dem Einsatzprofil. Dennoch legen die in [66] dargelegten Ergebnisse der Experteninterviews nahe, dass betriebliche Anforderungen wie mögliche Nutzlastverluste, kürzere Reichweiten im Vergleich zur täglichen Fahrleistung und lange Ladezeiten von den Nutzern als inakzeptabel betrachtet werden. Weshalb die die technischen Kriterien als Mindestanforderungen an die Fahrzeugkonzeption vor einer ökonomischen Bewertung zu erfüllen sind.

Die **ökologischen Kriterien** charakterisieren die **Nachhaltigkeit** der Fahrzeugkonzeptionen und folgen in der Relevanzreihenfolge hinter den ökonomischen und einsatztechnischen Kriterien. Die Klima- und Umweltfreundlichkeit wird anhand der CO_2-Emissionen und des Energieverbrauch bewertet und die sicherheitssteigernde Wirkung der Fahrautomatisierungssysteme anhand des Sicherheitspotentials. Die Befragung in [67] ordnet eine hohe Bedeutung der sicherheitssteigernde Wirkung der Fahrerassistenzsystemen in Entscheidungsfindung ein. Als Hauptmotive nannten die Befragten mehrheitlich den Wettbewerb um gut qualifizierte Fahrer sowie die Verbesserung des Unternehmensimages zur Erzielung von Wettbewerbsvorteilen. Ferner wird der Einfluss des vorherrschenden Fachkräftemangels auf die Entscheidungsbereitschaft für autonome Fahrsysteme auch in den Befragungen [68] und [36] hervorgehoben. Um die Bedeutung des Kriteriums Sicherheit auf die Kaufentscheidung quantifizierbar zu machen wurde die Zahlungsbereitschaft (Willingness to pay – WTP[6]) in Form einer kontingenten Bewertung, also einer direkte Preisabfrage für spezifische Sicherheitspotential durch den Einsatz der Fahrerassistenzsysteme ermittelt. Dabei zeigte sich, dass bei den befragten Lkw-Käufern auch mit erkenntlichen Sicherheitsgewinne keine Bereitschaft für höhere Gesamtbetriebskosten besteht. Andererseits sahen die Befragung in [70] zu autonomen Pkw in den USA im Jahr 2015, dass die Befragten unter anderem niedrige Versicherungsprämien, die wiederum durch das Sicherheitsmerkmal positiv beeinflusst werden könnten, als eines der wichtigsten Kaufkriterien für teil-, hoch- oder vollautomatisierte Fahrzeuge. Die Berücksichtigung des Fahrzeugsicherheits-merkmale in der Kalkulation der Kfz-Versicherungsprämien (z.B. Sicherheitsaufschlag

[6] Diese Theorie geht davon aus, dass jeder Konsument einen maximalen Preis besitzt, den er für ein bestimmtes Gut bereit ist zu zahlen. Dieser Preis ist äquivalent zu dem individuellen Wert bzw. dem Nutzen, den der Konsument dem Gut beimisst.

für den Einsatz von Fahrerassistenzsystemen (FAS)) und damit auf die Gesamtbetriebskosten ist damit ein Möglichkeit um die Relevanz der sicherheitssteigernde Wirkung der FAS in der Kaufentscheidung aufzuzeigen.

In einem ähnlichen Kontext wurde in [71–73] der Zusammenhang zwischen CO_2-Emissionen und der Bedeutung für das Unternehmensimage und Wettbewerbsvorteile diskutiert. Die Befragten gaben an, dass Klima- und Umweltfreundlichkeit von hoher Bedeutung für ihr Unternehmen ist, die Technologien aber zunächst wirtschaftlicher sein müssen. Andererseits sind CO_2-basierende Betriebskostenbestandteile in der aktuellen Betriebskostenstruktur von Nutzfahrzeugen etabliert, wie z.B. der CO_2-Preis in der Energieverbrauchsberechnung sowie CO_2-Kostensätze in der Kfz-Steuer und der Lkw-Maut. Der Einfluss auf die Nachhaltigkeit von Nutzfahrzeugen wird jedoch vorrangig durch die Erfüllung von Emissions- und Sicherheitsstandards politisch vorgegeben.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für die Entscheidungsmodellierung von Nutzfahrzeugkonzepten in Bezug auf Energieträger, Antriebsstrangsystemen und Automatisierungssystemen mehrere Kriterien ausschlaggebend sind. Dabei spiegelt die höhere Gewichtung der ökonomischen Kriterien die Kostenfokussierung in der organisatorischen Entscheidungsfindung bei Nutzfahrzeugen wider. Dies gilt sowohl für die Wahl zwischen alternativen Kraftstoffen und Antriebskonzepten als auch für den Einsatz von Automatisierungssystemen. Gleichzeitig zeigen insbesondere die Leistungsunterschiede zwischen den verschiedenen Antriebsoptionen, dass auch technische Kriterien einen wesentlichen Einfluss auf die Kaufentscheidung haben. Aus diesem Grund ist eine Überprüfung der Eignung der resultierenden technischen Eigenschaften der Nutzfahrzeuge für das jeweilige Einsatzprofil erforderlich. Dabei sind auch die Rahmenbedingungen der Energieinfrastruktur, insbesondere mit Blick auf deren zeitliche Integration in den Betriebsablauf, zu berücksichtigen. Im Hinblick auf die Eignungsfähigkeit von Automatisierungssystemen ist zusätzlich die Bewertung der grundlegenden technischen Voraussetzungen für den geplanten Einsatzfall notwendig. Darüber hinaus wirken sich Automatisierungsfunktionen auf die betriebliche Kostenstruktur aus und eröffnen potenzielle Möglichkeiten zur Steigerung der Fahrzeugauslastung, was wiederum in die wirtschaftliche Bewertung im Sinne einer erweiterten Betriebskostenrechnung einfließt. Die Befragungsergebnisse zeigen zudem, dass ökologische Kriterien bislang keinen direkten Einfluss auf die Auswahlentscheidung haben. Ihre Relevanz ergibt sich vielmehr aus betriebswirtschaftlichen Auswirkungen innerhalb der Kostenstruktur sowie aus regulatorischen Anforderungen im Rahmen der Typgenehmigung, die insbesondere hinsichtlich der Rolle alternativer Kraftstoffe innerhalb der Marktmodellierung in Kapitel 6 betrachtet werden.

Insgesamt bildet die Entscheidungsanalyse für Nutzfahrzeugkonzepte auf Basis ihrer Einsatzfähigkeit und Wirtschaftlichkeit die Grundlage für die nachfolgenden KapiteIn. Kapitel 4 widmet sich dabei der technischen Auslegung von antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifischen Nutzfahrzeugkonzepten, während Kapitel 5 die ökonomische Bewertung dieser Konzepte adressiert. Diese ökonomische Bewertung erfolgt als Bestandteil der übergeordneten integrierten Bewertung, wobei die erweiterten Fahrzeugnutzungskosten die Effekte verschiedener Technologien systematisch abbilden. Dabei wird in beiden Kapiteln ein durchgehend einsatzspezifischer, integrierter und systemischer Ansatz verfolgt, der die konkreten Anforderungen der jeweiligen Transportaufgabe berücksichtigt und eine systemisch erweiterte Bewertung unter Einbezug der zugehörigen Energieinfrastruktur ermöglicht.

3 Stand der Fahrzeugtechnik und Energieträger

Zur Ableitung der technischen und ökonomischen Eigenschaften der betrachteten Nutzfahrzeugkonzepte dient dieses Kapitel zunächst der systematischen Auswahl und Parametrisierung relevanter Eigenschaften der Komponenten von Antriebsstrang- und Fahrautomatisierungssystemen sowie der eingesetzten Energieträger auf Basis des aktuellen Stands der Technik. Grundlage hierfür bilden Markt- und Literaturrecherchen. In den folgenden Unterkapiteln werden zunächst segmentspezifische Basisparameter (Kapitel 3.1) für die betrachteten Nutzfahrzeugkonzepte abgeleitet. Anschließend folgen die relevanten Eingangsparameter für fossile und erneuerbare Energieträger (Kapitel 3.2), für die wesentlichen Fahrzeugkomponenten bei verbrennungsmotorischen, hybriden und elektrischen Antriebssträngen (Kapitel 3.3) sowie für automatisierte und vernetzte Fahrsysteme (Kapitel 3.4).

3.1 Ableitung fahrzeugsegmentspezifischer Basisparameter

Innerhalb der einzelnen Fahrzeugsegmente (siehe Tabelle 2) existieren aufgrund der Vielzahl möglicher Einsatzbereiche zahlreiche Konfigurationsmöglichkeiten, die sich in den Leistungskennwerten der Fahrzeuge widerspiegeln. Dennoch können einige Grundkonstanten zur Ableitung von Referenzfahrzeugen definiert werden. Als Grundlage werden Leistungskennwerte von dieselmotorischen Nutzfahrzeugen für den deutschen Markt im Jahr 2020 herangezogen. Die Werte werden durch den Median von vier repräsentativen Nutzfahrzeugmodellen in Standardausführung je betrachtetem Segment charakterisiert (siehe Tabelle 41 im Anhang). Die Auswahl der Nutzfahrzeugmodelle erfolgte durch die DEKRA[7] MarktexpertInnen mit der Absicht, durch die Auswahl ein breites Leistungsspektrum für das jeweilige Marktsegment abzubilden. In Tabelle 4 sind die Median-Leistungsparameter der dieselmotorischen Nutzfahrzeuge gelistet.

[7] Deutsche Expertenorganisationen zur Prüfung von Kraftfahrzeugen und technischen Anlagen

Tabelle 4: Median der Leistungsparameter dieselmotorischer Nutzfahrzeuge (Referenzfahrzeuge)

Nutzfahrzeug-segment	Leer-gewicht [kg]	Nutzlast [kg]	Nutz-volumen [m³]	Motor-leistung [kW]	Motor-hubraum [cm³]	Motor-drehmoment [Nm]	Kraft-stofftank [Liter]	Brutto-Kaufpreis [EUR$_{2020}$][8]
3,5t Transporter	1.990	1.130	8	97	2.056	324	91	31.159
7,5t Lkw	4.172	3.318	22	137	4.605	700	120	56.873
12t Lkw	5.847	6.352	36	159	5.186	875	115	69.593
18t Lkw	8.638	9.362	44	251	9.949	1.425	310	83.400
26t Lkw	10.945	15.055	51	299	11.003	1.750	390	103.167
40t Szm	7.170	25.844	91	433	14.020	2.200	395	117.846
Anhänger	6.986			-	-	-	-	51.850

Quelle: in Anlehnung an [11, 74, 75]

Typische Fahrzeugkonzepte lassen sich in die Baugruppen[9]: Fahrgestellstruktur, Fahrwerk, Antriebsstrang, Fahrerhaus und Karosserie, Elektronik sowie Sonstiges unterteilen [56]. Durch Bereinigung der Anteile des dieselmotorischen Antriebsstrangs und des Fahrerhauses, letzteres für voll-autonome Fahrzeuge, lassen sich in erster Annäherung antriebslose und fahrerhauslose Basisfahrzeugkonzepte ableiten. Diese Basisfahrzeugkonzepte werden wiederum im weiteren Verlauf dieser Arbeit für die Auslegung von antriebsstrang- sowie automatisierungsgradspezifischen Fahrzeugkonzepten verwendet.

Leergewicht

Das Leergewicht des Basisfahrzeugkonzepts wird über spezifische Massenfaktoren für einzelne Baugruppen und Komponenten nach [76] und [77] (siehe Anhang in Tabelle 42) und dem Leergewicht der Referenzfahrzeuge gemäß Tabelle 5 berechnet. Je nach Segment reduziert sich für das antriebslose Basisfahrzeugkonzept die Masse zwischen 16 bis 24 % gegenüber dem dieselmotorischen Referenzfahrzeug. Für das fahrerhauslose Basisfahrzeugkonzept einer 40t Szm reduziert sich die Masse zusätzlich um 6 %. Für die anderen fünf Nutzfahrzeugsegmente sind aufgrund der starren Fahrzeugaufbauten eine vereinfachte Differenzierung der Massenanteile des Fahrerhauses bzw. der fahrerspezifischen Schnittstellen im Fahrzeug über Massenfaktoren nicht einheitlich bestimmbar.

[8] (einschl. Aufbau u. Zusatzausrüstung, ohne MwSt)

[9] Zunehmend spielt auch Software eine zentrale Rolle, da Funktionen und Entwicklungskosten moderner Nutzfahrzeuge stark durch softwarebasierte Systeme geprägt werden (näheres hierzu in Kapitel 3.4.3).

Tabelle 5: Leergewicht der antriebs- und fahrerhauslosen Basisfahrzeuge in kg

		Nutzfahrzeugsegmente					
		3,5t Transporter	7,5t Lkw	12t Lkw	18t Lkw	26t Lkw	40 Szm
Mittleres Fahrzeugleergewicht inkl. Aufbau und Anhänger		1.990	4.172	5.847	8.638	10.945	13.942
- Masse des Antriebsstranges	Verbrennungskraftmaschine inkl. Kühlsystem	209	437	613	616	780	994
	Tanksystem inkl. Füllung	106	151	158	347	437	455
	Abgasnachbehandlungs-system	28	58	81	101	128	163
	Getriebe (Nass)	128	268	376	278	352	449
= Leergewicht des antriebslosen Basisfahrzeugs		1.520	3.258	4.619	7.296	9.247	11.881
- Fahrerhaus							800*
= Leergewicht des antriebs- und fahrerhauslosen Basisfahrzeugs							11.031

*Annahme basierend auf Expertenangabe (Produktionsmitarbeiter eines europäischen Lkw-Herstellers)
Quelle: Eigene Berechnung basierend auf [76, 77]

Aerodynamik und Reifen

Zu den fahrwiderstandsrelevanten Kräften die auf das Fahrzeug wirken, gehören neben der Fahrzeugmasse auch der Roll- und der Luftwiderstand. Der Rollwiderstand wird durch das Fahrzeuggewicht und den Rollwiderstandsbeiwert f_r definiert [78]. Die in Tabelle 6 aufgeführten fahrzeugsegmentspezifischen Rollwiderstandsbeiwerte stellen den aktuellen Stand der Technik dar und unterliegen den Grenzwerten für leichte und schwere Nutzfahrzeuge der UN Regulation 117.02 [79]. Der Luftwiderstand ergibt sich aus der Multiplikation der Fahrzeugstirnfläche mit dem Luftwiderstandsbeiwert c_w. Auf Basis der in [11] ermittelten Bandbreiten, unter Berücksichtigung aktueller aerodynamischer Fahrzeugmaßnahmen, sind in Tabelle 6 die fahrzeugsegmentspezifischen Querschnittsflächen und Luftwiderstandsbeiwert für die antriebslosen Basisfahrzeugkonzepte aufgelistet.

Für das fahrerhauslose Fahrzeugkonzepte (hier nur 40t Szm) ergeben sich mehrere Gestaltungsspielräume zur aerodynamischen Optimierung des Freiraums zwischen der Stirnfläche der Sattelzugmaschine und des Sattelanhängers. Das Potenzial zur Reduzierung der Fahrwiderstandsfläche ist jedoch begrenzt, da die Querschnittsfläche des im Sattelzug geführten Sattelanhängers maßgebend die Fahrwiderstandsfläche bestimmt. In Anlehnung an einen Modellversuch in [80] wird für das fahrerhauslose Fahrzeugkonzepte ein um 20% geringer Luftwiderstandsbeiwert angenommen. Neukonzeptionen des gesamten Fahrzeugkonzeptes, z.B. durch Verschiebung oder Verlängerung des Sattelanhänger (und damit Erweiterung des Laderaums) bis zur Stirnfläche der Sattelzugmaschine werden hier nicht betrachtet.

Tabelle 6: Luft- und Rollwiderstandsbeiwerte der antriebs- und fahrerhauslosen Basisfahrzeuge

	Nutzfahrzeugsegmente					
	3,5t Transporter	7,5t Lkw	12t Lkw	18t Lkw	26t Lkw	40 Szm
Luftwiderstand antriebslosen Basisfahrzeugs						
Stirnfläche A in m^2	3,55	7,5	8,8	9	9	10
Luftwiderstandsbeiwert c_w	0,37	0,45	0,55	0,55	0,55	0,53
Widerstandsfläche A * c_w	1,3	3,15	4,83	4,95	4,95	5,30
Luftwiderstand fahrerhausloses Basisfahrzeugs						
Widerstandsfläche A * c_w						4,24
Rollwiderstandsbeiwert[10] f_r	8,5	7,35	6,75	6	6	5,37
Quelle: [11, 80, 81]						

Herstellungskosten

Für die Ableitung der Herstellungskosten aus dem Bruttolistenpreis der Referenzfahrzeuge (in Tabelle 4) wird in Anlehnung an [82] standardmäßig eine Herstellermarge von 0,45 angenommen. Über spezifische Kostenfaktoren für einzelne Baugruppen und Komponenten nach [83] und [84] (siehe Anhang in

Tabelle 43 Tabelle 43) werden die einzelnen Systemkosten ermittelt. In Tabelle 7 sind die abgeleiteten Herstellungskosten für antriebslose und fahrerhauslose Basisfahrzeugkonzepte nach dem Subtraktionsansatz dargestellt.

Tabelle 7: Herstellungskosten der antriebs- und fahrerhauslosen Basisfahrzeuge in $EURO_{2020}$

		Nutzfahrzeugsegmente					
		3,5t Transporter	7,5t Lkw	12t Lkw	18t Lkw	26t Lkw	40 Szm
abgeleitete Fahrzeug-Herstellungskosten (Bruttopreis ohne Margen)		17.137	31.280	38.276	45.870	56.742	93.333
- Antriebsstrang	Verbrennungskraftmaschine inkl. Kühlsystem	2.869	5.236	6.407	7.679	9.499	10.850
	Tanksystem	106	194	237	284	352	402
	Abgasnachbehandlungs-system	1.275	2.327	2.848	3.413	4.222	4.822
	Getriebe	1.063	1.939	2.373	2.844	3.518	4.019
= Herstellungskosten des antriebslosen Basisfahrzeugs		11.825	21.583	26.411	31.650	39.152	73.240
- Fahrerhaus							5.840*
= Herstellungskosten des antriebs- und fahrerhauslosen Basisfahrzeugs							67.400
* Daten aus Online Marktplatz (partsbit.de), **Quelle: Eigene Berechnung basierend auf [83–85]**							

[10] Reifen-Rollwiderstandsgrenzwerte auf Basis der UN Regulation No 117.02: LNF (C2-Reifenklasse) 9 N/kN; SNF (C3-Reifenklasse) 6,5 N/kN

3.2 Parametrisierung der Antriebsenergieträger

Für eine effektive Substitution fossiler durch erneuerbare Energierohstoffe im Straßengüterkraftverkehr, wird neben der Nutzung von lokal CO_2-freien Energieträgern wie elektrischer Strom und Wasserstoff auch die Einführung von CO_2-neutralen Energieträgern wie biogene oder strombasierte Kraftstoffe diskutiert. Ihre Markteinführung hängt von verschiedenen Randbedingungen wie CO_2- und Energiebilanz, Verfügbarkeit bzw. Produktionskapazitäten, Gesetzgebung, Wirtschaftlichkeit im Einsatz und Nutzerakzeptanz ab [86]. Besondere interessant dabei ist, dass die Analyse aus der Perspektive der Energiebereitstellung und -nutzung unterschiedliche Vorteile aufzeigt. Für eine ganzheitliche Potenzialabschätzung möglicher Energieträger-Antriebs-kombinationen im Rahmen dieser Arbeit sind daher insbesondere auch die Eigenschaften der Energiebereitstellung zu berücksichtigen. In den folgenden Unterkapiteln werden somit für fossile und erneuerbare Diesel- und Erdgaskraftstoffe sowie für Strom und Wasserstoff, die für die Modellierungsarbeiten relevanten Eigenschaften definiert. Diese umfassen insbesondere die Betrachtung der Kraftstoffeigenschaften, die spezifischen Gestehungskosten sowie die Energie- und CO_2-Intensität der Energieträger.

3.2.1 Fossile und erneuerbare Dieselkraftstoffe

Der erdölbasierte Dieselkraftstoff wird in Raffinerien in mehreren Stufen aus Rohöl gewonnen. Im Jahr 2021[11] setzt sich der Nettodieselpreis aus 41,31 Cent/Liter Produktbeschaffungskosten und 22,53 Cent/Liter Deckungspreis[12] zusammen [87]. Der Produktpreis für den fossilen Dieselkraftstoff korreliert historisch mit dem Rohölpreis [88], der sich in Deutschland am UK Brent Spotpreis orientiert. Daher wird für die zukünftige Abschätzung des Dieselpreises die Prognose der Rohölpreisentwicklung herangezogen.

Gemäß § 4 der 10. BImSchV („Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraft- und Brennstoffen“) muss der an der Zapfsäule als „Standard“-Diesel angebotene Kraftstoff die Mindestanforderungen in der DIN EN 590 erfüllen [89]. Diese definiert im Wesentlichen die Kraftstoffeigenschaften hinsichtlich Dichte, Zündwilligkeit, Siedebereich, Viskosität, Flammpunkt und

[11] Im Jahr 2020 sank der Produktpreis kurzzeitig auf 26,89 Cent/Liter (Nachfrage Rückgang aufgrund der Pandemie), welcher als Basiswert ungeeignet ist. Um eine konsistente Datenbasis vorzustellen, werden im Folgenden auch für die anderen Energieträger die Preiszusammensetzungen aus dem Jahr 2021 herangezogen.

[12] Der Deckungsbeitrag beinhaltet Kosten für Transport, Lagerhaltung, gesetzliche Bevorratung, Verwaltung, Vertrieb, für die Beimischung von Biokomponenten und für den CO_2-Aufschlag gemäß BEHG. Zwischen 2005 und 2020 ist der Deckungsbeitrag leichter gestiegen. [87].

Schwefelgehalt [86]. Die Kraftstoffeigenschaften für die nachfolgend beschriebenen Dieselkraftstoffe sind in Tabelle 44 im Anhang zusammengefasst.

Ein wichtiger Punkt im Hinblick auf die CO_2-Bilanz von Dieselkraftstoffen ist die seit 2009 mögliche und mittlerweile gängige Beimischung von max. 7 Vol% von biogenem Diesel. Daher wird auch die Bezeichnung **B7 Diesel** verwendet. Die chemische Bezeichnung für den Biodiesel lautet **FAME** (**Fatty Acyd Methyl Ester**, Deutsch: Fettsäure-Methylester), der durch Umesterung von Pflanzenölen (meist Rapsöl) unter Einsatz von Methanol gewonnen wird. Gegenüber der fossilen Diesel-Prozesskette werden bei der Rapsöl-Methylester Herstellung aus Rapsöl 47% und aus Abfallprodukten 91% der gesamten THG Emissionen (WtW) eingespart [90]. Die Eigenschaften des FAME Kraftstoffes (B100) sind in der DIN EN 14214 technisch festgelegt. Höhere Beimischungen von FAME in B7 sind aufgrund der zu hohen spezifischen Dichte von FAME (890 kg/m³) nicht mehr mit der Kraftstoffnorm EN 590 kompatibel und daher an öffentlichen Tankstellen in Deutschland nicht zulässig. Die Herstellungskosten für FAME liegen nach [91] zwischen 0,36 und 0,79 $EURO_{2020}$/Liter. Darüber hinaus erlaubt die DIN EN 590 Beimischungen von paraffinischen Kraftstoffen. Die Eigenschaften der paraffinischen Kraftstoffe sind in der DIN EN 15940 festgelegt. [86] Dazu zählen der bioparaffinische HVO-Diesel und der synthetisch, paraffinische Dieselkraftstoffe FT-Diesel.

Bei der Herstellung von **HVO (Hydrotreated Vegetable Oils) Diesel** werden im Gegensatz zu FAME die Pflanzenölmoleküle durch direkte Hydrierung mit Wasserstoff in Dieselkraftstoff umgewandelt [86]. Als Energiequelle kommen verschiedene Pflanzenöle in Frage: Raps-, Sonnenblumen-, Palm- und Sojabohnenöl. Gegenüber der fossilen Diesel Route werden bei Verwendung von Rapsöl 44% und aus Abfallprodukten 88% der gesamtem THG Emissionen (WtW) eingespart [90]. Hinsichtlich der Kraftstoffanforderungen nach DIN EN 590 zeichnet sich HVO durch eine zu geringe spezifische Dichte (780 kg/m³) und eine hohe Cetanzahl (>70) aus [92, 93]. Die Herstellungskosten von HVO liegen nach [91, 94] zwischen 0,71 und 1,11 $EURO_{2020}$/Liter. Allerdings ist seit der öffentlichen Markteinführung von HVO in Deutschland im Jahr 2024 ein Preisunterschied von 0,10 $EURO_{2020}$/Liter zu beobachten [95], was den unteren Wert der genannten Herstellungskosten entsprechen würde.

Synthetischer Diesel kann aus Strom (PtL: Power to Liquid), Kohle (CtL: Coal to Liquid), Erdgas (GtL: Gas to Liquid) oder Biomasse (BtL: Biomass to Liquid) als Ausgangsstoff hergestellt werden. Da die CtL- und GtL-Verfahren jedoch auf fossilen Energieträgern basieren, kann mit ihnen keine signifikante Reduktion der CO_2-Emissionen erreicht werden. Bei synthetischem Diesel über die BtL-Route sowie auch bei FAME und HVO wird die CO_2-Bilanz der Dieselverbrennung hingegen merklich verbessert, da die emittierte CO_2-Menge im Fahrzeugbetrieb theoretisch zuvor von

den Pflanzen als Energiequelle aufgenommen wurde. Das Reduktionspotenzial hängt jedoch vom Verwertungsanteil[13]der Nutzpflanze ab [96]. Bei der PtL-Route wird zunächst Wasserstoff (Synthesegas) per Elektrolyse unter Einsatz von Strom und Wasser erzeugt.[14] Im nächsten Schritt wird das aus der Atmosphäre gewonnene Kohlendioxid über die reverse water gas shift reaction (rWGS) zu Kohlenmonoxid (Synthesegas) reduziert. So entsteht ein geschlossener CO_2-Kreislauf, weshalb synthetische Kraftstoffe eine CO_2-neutrale Bilanz erreichen können [90]. Es gibt drei wesentliche PtL-Syntheseverfahren mit unterschiedlichen Endprodukten (synthetische Dieselkraftstoffformen), auf die im Folgenden beschrieben werden.

Bei der **Fischer-Tropsch-Synthese** (FT-Synthese) werden die Synthesegase H2 und CO durch mehrere chemische Syntheseprozesse unter Einsatz von Strom zu langkettigen Kohlenwasserstoffen umgewandelt. Diese können wiederum über verschiedene Produktionsverfahren gewonnen werden. Die in den meisten Studien hinterlegte Route ist die Produktion von FT-Diesel über die Niedertemperatur Protonenaustausch-membran-Elektrolyse (PEMEC) und die Gewinnung von CO_2 direkt aus der Umgebungsluft (Direkt-Air-Capture). Die gesamte FT-Synthese erzielt gegenüber der konventionellen Dieselraffination eine THG-Emissionsreduktion von fast 100% (ohne Berücksichtigung der Transportemissionen), ist allerdings auch um den Faktor 7 energieintensiver in der Kraftstoffherstellung [90]. Das Endprodukt ist ein synthetisch paraffinischer Dieselkraftstoff, der auch FT-Diesel genannt wird. FT-Diesel hat allerdings eine zu geringe Dichte (780 kg/m³) und Siedetemperatur als in der europäischen Dieselkraftstoffnorm EN 590 gefordert. In Deutschland werden somit HVO- und FT-Diesel in Reinform als XtL Diesel gekennzeichnet [97].

Die Gestehungskosten von FT-Diesel werden von verschiedenen Einflussfaktoren bestimmt, wie die eingesetzten Produktionstechnologien, die Effizienz des gesamten Produktionsprozesses, der Skalierbarkeit und Kapazität der Anlagen sowie die Rohstoffpreise. Besonders relevant sind die Stromerzeugungskosten (z.B. für PV- oder Wind-Strom) in Abhängigkeit vom Ort der Energieproduktion (z.B. MENA-Region) und die damit verbundenen Transportkosten nach und innerhalb Deutschlands. Den größten Anteil an den resultierenden Kraftstoffherstellungskosten machen die volatilen Stromerzeugungskosten aus [98]. Eine Zusammenstellung ausgewählter Kostenuntersuchungen [99–106] zu FT-Diesel, unter Annahmen für großskalige Produktionskapazitäten, findet sich im Anhang in Abbildung 54. Die resultierende

[13] Biokraftstoffe 1. Generation: Nur ausgewählte Teile der Pflanze; 2. Generation: vollständige Pflanze; 3. Generation: aus Algen

[14] Auch als electro fuels, kurz e-fuels (deutsch strombasierte Kraftstoffe) oder auch wasserstoffbasierte synthetische Kraftstoffe bezeichnet

Bandbreite der prognostizierten Herstellungskosten liegt zwischen 0,7 und 5,0 $Euro_{2020}$/Liter (ohne Energiesteuern und Deckungsbeitrag).

Die Gestehungskosten für importierten FT-Diesel, der mit Strom aus einer Kombination von PV- und Wind-Energie aus der MENA-Region erzeugt wird, liegen nach [104] zwischen 3,83 Euro/l (bei H2-Kosten von 6,10 Euro/kg) und 2,58 Euro/l. Nach [107] sind die Kosten für inländischen FT-Diesel um 0,70 Euro/l höher als für importierten FT-Diesel aus der MENA-Region. Allerdings weist die Studie auf die begrenzte Energieproduktionskapazität für erneuerbare Energien in Deutschland hin, die für eine inländische PtL-Kraftstoffproduktion notwendig ist.

Neben dem Fischer-Tropsch-Verfahren können PtL-Dieselkraftstoffe auch über die Methanolsynthese hergestellt werden. Das entstehende Methanol kann durch Dehydratisierung zu **Dimethylethern (DME)** Kraftstoff oder durch Zugabe von Formaldehyd zu **Oxymethylenether (OME)** Kraftstoff synthetisiert werden. Alternativ kann DME auch über Synthesegas (Methan) umgesetzt werden. Sowohl bei der Methanolsynthese als auch bei der Methanisierung muss DME unter Druck verflüssigt werden. Deshalb sind Drucktanks für die Fahrzeuganwendung und eine separate Tankinfrastruktur erforderlich. Vorteilhaft ist die gute Zündwilligkeit von DME (Cetanzahl 55). Nachteilig sind die fehlende Schmierfähigkeit, die geringere spezifische Dichte von 670 kg/m³ und damit der geringere Heizwert im Vergleich zu Dieselkraftstoff. Zur Kostenabschätzung von DME werden die Herstellungskosten von Methanol (0,43 bis 1,16 $Euro_{2020}$/Liter Methanol) herangezogen. Nach [108] liegen die Kosten für DME zwischen 0,46 und 1,33 $Euro_{2020}$/Liter DME. Die gesamte DME-Route zeichnet sich wie die FT-Synthese als THG-Neutral aus und ist sehr energieintensiv in der Kraftstoffproduktion [90].

Bei der Verbrennung von OME wird unteranderem wegen der fehlenden Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung weniger Ruß- und Stickoxide freigesetzt. Die niedrige Siedetemperatur (42°C im Vergleich zu 170-370°C Diesel) von OME bzw. OME_1 führt allerdings beim Einsatz in Fahrzeugen grundsätzlich zu Problemen. Durch eine Kettenverlängerung von OME_1 zu $OME_{3\text{-}5}$ (**Oxymethylendimethylether**) durch Zusatz von Trioxan (etablierte Methode) bei der OME-Synthese können wiederum dieselähnliche Kraftstoffeigenschaften erreicht werden [109]. Die gesamte OME-Synthese (Methanolsynthese, Formaldehydsynthese, Methylalsynthese, Trioxansynthese und OME-Synthese mit CO2 aus Biogasaufbereitung) ist wie die FT-Synthese THG-Neutral und sehr energieintensiv in der Kraftstoffproduktion [90]. $OME_{3\text{-}5}$ sind sehr entzündlich (Cetanzahl von 84) und leicht verdampfbar (Siedebereich von 155 bis 242°C,). Allerdings liegt die spezifische Dichte von $OME_{3\text{-}5}$ (1067 kg/m³) über dem Grenzbereich (820 bis 845 kg/m³) der Norm EN 590 [110]. Neben der fehlenden bzw. umständlichen Blendfähigkeit ist die Synthese komplex und relativ

teuer. Die Herstellungskosten liegen zwischen 0,81 und 2,15 $Euro_{2020}$/Liter OME und sind damit doppelt so hoch wie bei Methanol. [108]

Ein weiterer synthetischer Dieselkraftstoff ist 1-Oktanol (hauptsächlich aus oxygenierten Kohlenwasserstoffen), das auf Basis der DME-Herstellungsroute zunächst zu Ethanol und dann zu 1-Butanol (Aldolkondensation) umgewandelt wird und daher auch zu den „höheren Alkoholen“ eingestuft wird. [111] 1-Oktanol ermöglicht aufgrund der hohen Sauerstoffkonzentration eine nahezu rußfreie Verbrennung und führt zu geringeren Partikelemissionen. Darüber hinaus zeigt 1-Oktanol als Dieselkraftstoff geeignete Dichteeigenschaften und eine gute Materialverträglichkeit (der kraftstoffführenden Leitungen). Aufgrund der niedrigen Cetanzahl und der hohen Viskosität ist sie nicht kompatibel mit DIN EN 590 [112].

In Tabelle 8 sind die relevanten Eigenschaften von fossilem, biologischem und synthetischem Dieselkraftstoff auf Basis der beschriebenen Herstellungsrouten zusammengefasst.

Tabelle 8: Relevante Eigenschaften fossiler, biologischer und synthetische Dieselkraftstoffe

Kraftstoff	Gestehungskosten [$EURO_{2020}/l_{Diesel}$]	Vol. Heizwert [MJ/l_{Diesel}]	WtT Energieeinsatz [MJ/MJ_{Diesel}]	WtT THG-Emissionen[15] [g CO_{2eq}/MJ_{Diesel}]
B7 Diesel	0,63	35,9	0,26	18,9
FAME	0,36-0,88	33	0,19-1,11 [1]	8,3-48,4 [1]
HVO	0,71-1,11	30	0,16-1,12 [1]	11,1-51,9 [1]
FT-Diesel	0,7-5	30	1,83	0,8
DME	0,46-1,33	19	1,39	1,7
OME	0,81-2,15	20	1,89	1,9
1-Oktanol	2,85	32	1,89 [2]	1,9 [2]

[1] Untere Werte: Rest- und Abfallstoffen, Oberer Werte: Rapsöl; [2] Annahme wie OME

Quelle: [90, 104, 112–114]

[15] Der heizwertbezogene Emissionsfaktor (daher die TtW CO2 Emissionen) für Diesel beträgt 73,2 g CO2eq/MJDiesel.

3.2.2 Fossiles und erneuerbares Erdgas

Erdgas hat einen geringeren Kohlenstoffgehalt als Dieselkraftstoff und bietet daher als alternative Antriebsenergie das Potenzial, den CO_2-Verbrauch[16] der motorischen Verbrennung zu senken. Die geringe volumetrische Energiedichte von Erdgas erfordert eine Verdichtung auf einen Druck von 200 bar (CNG; Compressed Natural Gas) oder eine kryogene Verflüssigung bei -162 °C bei atmosphärischem Druck (LNG, Liquified Natural Gas), um es als Kraftstoff in Fahrzeugen einzusetzen zu können. Die Eigenschaften von komprimiertem Erdgas als Kraftstoffe (CNG) sind in der DIN EN 16723-2:2017-10 festgelegt, die einen Methananteil von mindestens 80% vorschreibt. Die wesentlichen Eigenschaften von verflüssigtem Erdgas (LNG) sind in der Norm DIN EN ISO 16903 festgelegt, die einen Methananteil von mindestens 75 Vol% definiert. Heute wird typischerweise Erdgas mit einem Methananteil von 90 Vol% (H-Gas Qualität) betankt. [115] Als klimaneutrale Alternativen gelten biologisches und synthetisches Methan. Biomethan als Grundlage für CNG wird derzeit aus kommunalen als auch landwirtschaftlichen Abfällen (Gülle) gewonnen [115]. Synthetisches Methan, auch als Power to Gas (PtG) bezeichnet, wird durch die Methanisierung von Wasserstoff unter Einsatz von CO_2 (aus Rauchgas) gewonnen. Eine detaillierte Beschreibung der Verfahren findet sich in [116]. Da in den beiden Kraftstoffnormen für CNG und LNG nicht nach der Primärenergiequelle des Methans unterschieden wird und biologisches und synthetisches Methan chemisch identisch mit fossilem Methan sind, können diese laut Norm uneingeschränkt dem fossilen Erdgas bzw. der bestehenden CNG-/LNG-Tankinfrastruktur beigemischt werden [115, 117].

In Tabelle 9 sind die spezifischen Kosten, THG-Emissionen und Energieaufwendungen für die Bereitstellung (Herstellung, Transport und Aufbereitung für die Endnutzung) von CNG und LNG differenziert nach fossilem, biologischem und synthetischem Methan als Ausgangsprodukt dargestellt. Die Bereitstellung von Biomethan aus kommunalen Abfällen ist nicht zu 100 % klimaneutral, da bei der Aufbereitung (Vergärung) Emissionen entstehen. Demgegenüber können mit Biomethan aus landwirtschaftlichen Abfällen (Gülle) sogar negative Emissionswirkungen erzielt werden können, da die Gülle das Methan bindet, das sonst direkt in die Atmosphäre ausgestoßen werden würde. Allerdings ist der Energieaufwand für die letztgenannte Option von allen Optionen am höchsten. Die Emissions- und Energieauswirkungen von synthetischem Methan aus erneuerbarem Strom und CO2 aus Rauchgas sind vergleichbar mit denen von biologischen Methan aus kommunalen Abfällen. Insgesamt ist die Herstellung von biologischem und synthetischem Methan um ein Vielfaches energieintensiver und teurer als die von fossilem Methan. [118]

[16] Aber der Methanschlupf bei Erdgas trägt zusätzlich zu den THG-Emissionen bei

Tabelle 9: Vergleich relevanter Eigenschaften fossiles, biologisches und synthetisches CNG und LNG

Ausgangsprodukt	Endprodukt	Herstellungs-kosten in $EURO_{2020}/MJ_{xNG}$	WtT THG-Emissionen[17] in g CO_{2eq}/ MJ_{xNG}	WtT Energieeinsatz in MJ/MJ_{xNG}
Fossiles Methan	**CNG**	0,69	15,1	0,15
	LNG	0,75	16,6	0,18
Bio-Methan	**CNG**	1,38	9,5-21 [1]	0,89-1,06 [1]
	LNG	1,52	13,8-25,3 [1]	1,0-1,18 [1]
Syn-Methan	**CNG**	2,55	2,4	1,03
	LNG	3,5	6,7	1,14

[1] Untere Werte: Rest- und Abfallstoffen, Oberer Werte: Nutzpflanzen, mit gravimetrischen Heizwert 50 MJ/kg

Quelle: [90, 119, 120]

3.2.3 Ladestrom

Die Nutzung von elektrischem Strom als Antriebsenergieträger neben Wasserstoff ist im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung des Straßengüterkraftverkehrs von entscheidender Bedeutung, da diese im Gegensatz zu anderen Energieträgern keine Emissionen im Fahrzeugbetrieb verursachen.

Im Jahr 2020 wurden 47 % des in Deutschland eingespeisten Stroms aus erneuerbaren Energiequellen generiert, was einem CO_2-Ausstoß von 375 g CO_2/kWh entspricht [121]. Nach [122] beliefen sich die durchschnittlichen Herstellungskosten für Strom aus erneuerbaren Quellen (Photovoltaik und Windkraft) auf 7,62 $Cent_{2020}$/kWh, während der Strom aus fossilen Quellen (Kohle) im Durchschnitt 14,33 $Cent_{2020}$/kWh in Deutschland kostete.[18] Zusätzlich sind Steuern, Netzentgelte und Abgaben zu berücksichtigen, welche im Jahr 2020 58,3 % des Strompreises ausmachten [123].

Hinsichtlich des Ladestrompreises für elektrische Fahrzeuge ist eine Differenzierung nach der Art der Ladeeinrichtung erforderlich. Für das Laden von elektrischen Nutzfahrzeugen über den eigenen Gewerbeanschluss auf dem Betriebshof (Depot) wird der Gewerbestrompreis berechnet, der im Jahr 2021 bei 0,27 $EURO_{2020}$/kWh (ohne MwSt.) lag [124]. In Kombination mit einer leistungsfähigen Wallbox-

[17] Der heizwertbezogene Emissionsfaktor für CNG beträgt 56,4 und für LNG 55,1 g CO2eq/MJ .

[18] Kosten der Stromerzeugung 2021 in Deutschland: Solarenergie 3,12 – 11,01 ct/kWh; Onshore-Windenergie 3,94-8,29 ct/kWh; Offshore-Windenergie 7,23-12,13 ct/kWh, Braunkohle 10,83 - 15,43 ct/kWh; Steinkohle 11,03 - 20,04 ct/kWh

Ladeeinrichtung[19] (Steckertyp 2) können so Ladeleistungen bis zu 22 kW (Gleichstrom, DC oder Wechselstrom, AC) ermöglicht werden.

Für größere Fahrzeugbatteriekapazitäten und begrenzte Ladezeitmöglichkeiten ermöglicht der CCS-2 Standard eine Schnellladeleistung bis 500 kW (Wechselstrom, DC) [125]. Mit Blick auf das fortgeschrittene, öffentliche Ladeinfrastrukturnetz für batterie-elektrische Pkw lag der Strompreis pro kWh für DC-Schnellladung im Jahr 2021 um durchschnittlich 0,22 $EURO_{2020}$/kWh über dem Haushaltstrompreis (0,32 $EURO_{2020}$/kWh) [126]. Der höhere Preis stellt die Gebühr für den Betrieb der Ladestationen (Charge Point Operators oder eMobility Service Providers fee) dar [126]. Im Jahr 2024 gab Milence, ein europäischer Anbieter von Ladestationen für Nutzfahrzeuge, erstmalig einen Standardtarif für DC-Ladung bei 0,40 $EURO_{2020}$/kWh an [127].

Für batterie-elektrische schwere Nutzfahrzeuge im Fernverkehr mit begrenzten Lademöglichkeiten zwischen den Fahrten werden perspektivisch Batteriekapazitäten von über 500 kW benötigt. Daher sind Ladeleistungen erforderlich, die über dem CCS-Standard liegen. Im Jahr 2021 wurde erstmals der Megawatt Charging System Standard vorgestellt, der für eine Ladespannung von bis zu 1.250 Volt und eine Stromstärke von 3.000 Ampere ausgelegt ist, was theoretisch eine Ladeleistung von bis zu 3,75 Megawatt ermöglicht (für den Nutzfahrzeugeinsatz werden vermutlich bis zu 1,25 Megawatt ausreichen) [125]. Im Jahr 2024 laufen noch die eichrechtliche Zertifizierung der Ladetechnik und parallel dazu die Geräteentwicklung statt, so dass voraussichtlich ab 2025 die ersten Ladestationen aufgebaut werden könnten [125]. Zusammenfassend sind die Eigenschaften von Stromladeeinrichtungen für Nutzfahrzeuge in Tabelle 10 gelistet.

Tabelle 10: Unterscheidung des Ladestroms in Abhängigkeit der Ladeeinrichtung

Ladeeinrichtung	**Stecker-Standard**	**Ladeleistung in kW**	**Ladestrompreis ohne MwSt. in $Euro_{2020}$/kWh**
AC- oder DC-Normalladen	IEC 62196 Typ 2	Bis 22	0,27
DC-Schnellladen	IEC 62196-3 Combined Charging System (CCS)	Bis 500	0,40*
DC-Hochleistungsladen	Megawatt Charging System (MCS)	Bis 3.750 (bis 1.250 wahrscheinlich)	0,50*

Quelle: [125–129] *Annahme auf Basis von [130, 131]

[19] Gewerbe- und Industriegebäude haben oft Zugang zu Dreiphasigen Wechselstrom

3.2.4 Komprimierter und verflüssigter Wasserstoff

Im Jahr 2020 betrug der Anteil aus erneuerbaren Quellen bei Wasserstoff 5 % [121]. Überwiegend wird grauer Wasserstoff verwendet, der durch Dampfreformierung aus fossilen Brennstoffen wie Kohle oder Erdgas hergestellt wird. [104] beziffert die reinen Gestehungskosten für grauen Wasserstoff mit 1,50 $EURO_{2020}/kgH_2$. Prognosen für die Herstellungskosten von grüner Wasserstoff variieren in der Literaturlandschaft. Nach [132] liegen die prognostizierten Herstellungskosten zwischen 2 und 13 Euro/kgH2 und nach [133] zwischen 1,4 bis 6 Euro/kgH2. Wobei letzteres ausschließlich von großskaligen Produktionen ausgeht. Den größten Einfluss auf den Wasserstoffkosten haben der Stromgestehungskosten und die Auslastung und der Wirkungsgrad der Elektrolyseanlage, die wiederum erheblich von Standortbedingungen charakterisiert sind. In [133] ist berechnet, dass für die PV-basierten Wasserstofferzeugung aus Südeuropa oder Nordafrika die Kosten bis 2050 auf 1,5 Euro/kgH2 sinken könnten. Voraussetzung hierfür sind entsprechende hohe Kostendegression bei der Stromerzeugung und H2-Elektrolyse. Dabei wurde der deutsche Wasserstoffmarkt vom europäischen Binnenmarkt profitieren, wenn die bestehende Gasinfrastruktur genutzt werden würde um vergleichsweise geringen Transportkosten anzubieten. [134] geht für den Transport aus MENA über Pipeline von 0,33 Euro/kgH2. Über Schiffe liegen die Kosten zwischen 0,57 und 1,18 Euro/kgH2. Zusätzlich sind Kosten für die Verteilung innerhalb Deutschland über Trailer oder Pipeline von zwischen 0,14 und 0,67 Euro/kg. Im Vergleich dazu liegen nach [134] die Bezugskosten von Wasserstoff aus deutscher Produktion auf Basis von Offshore-Strom bei rund 2,4 Euro/kg H2.

Wasserstoffgas hat unter Normalbedingungen eine hohe massenbezogene Energiedichte, aber eine relativ niedrige Energiedichte pro Volumeneinheit. Um Wasserstoff als Kraftstoff in Fahrzeugen mit begrenztem Bauraum möglichst effizient speichern zu können, wird dieser entweder stark komprimiert (CH2; Compressed Hydrogen) oder tiefkalt auf -253°C verflüssigt (LH2; Liquified Hydrogen). Für CH2 haben sich zwei Industriestandards durchgesetzt: 350 Bar und 700 Bar. Die Betankungsprotokolle sind in den SAE J2601/5 und in der ISO 19880-Reihe festgelegt. Die relevante Kraftstoffnorm für Wasserstoff ist die DIN EN 17124, die in der 10. BImSchV integriert ist. LH2 als Kraftstoff für Nutzfahrzeuge wird derzeit in Pilotprojekten getestet, daher liegen noch keine Standards vor. Für die Konditionierung müssten nach [135] für CH2 Kosten zwischen 0,5 und 0,98 Euro/kgH2 und für LH2 zwischen 1,45 und 3,07 Euro/kgH2 auf die Wasserstoffherstellungskosten dazu addiert werden. Zusätzlich fallen Kosten für die Finanzierung des Ausbau neuer H2-Infrastruktur an. Diese Infrastrukturabgabe könnten sich nach [135] zwischen 0,34 und 3,13 Euro/kg belaufen. Allerdings betrug der Tankstellenpreis für 700 Bar CH2 11 EUR_{2020}/kgH_2 und 350 Bar CH2 9,50 EUR_{2020}/kgH_2 im Jahr 2021, wobei dieser aufgrund der volatilen Marktsituation Anfang der 2020er Jahre sogar auf 13,5 $EUR_{2020}/kg\ H_2$ im Jahr 2023 anstieg. Für 350 Bar CH2 werden nach Angaben der

Infrastrukturanbieter aufgrund der weniger energieintensiven Komprimierung 1 bis 2 EUR_{2020}/kgH_2 weniger berechnet. [136] Tabelle 11 fasst die relevanten Eigenschaften differenziert zwischen den Wasserstoffformen als Antriebsenergie für Nutzfahrzeuge zusammen.

Tabelle 11: Unterscheidung des Wasserstoff-Eigenschaften in Abhängigkeit der Speichertechnologie

Wasserstoffform	**WtT THG-Emissionen in g CO_{2eq}/ MJ_{H2}**	**WtT Energieeinsatz in MJ/MJ_{H2}**	**Tankstellenpreis ohne MwSt. in EUR_{2020}/kgH_2**
Komprimierter Wasserstoff (CH2) bei 350bar	9,5	0,87	7,86
Komprimierter Wasserstoff (CH2) bei 700bar	9,5	0,87	9,26
Flüssigwasserstoff (LH2)	3,6	0,96	10,83*

**Kostenannahme basierend auf zusätzlich höheren Energieeinsatz von ca. 17 bis 18% des Energieinhaltes des Wasserstoffs [128]*

Quelle: [90, 136–139]

3.3 Parametrisierung der Antriebsstrangkomponente

Zur Auslegung verbrennungsmotorischer und elektrischer Antriebsstrangkonzepte für die betrachteten Nutzfahrzeugsegmente sollen die wesentlichen Eigenschaften der Schlüsselkomponenten nach dem Stand der Technik parametrisiert werden. Der Fokus liegt dabei auf technologiespezifischen Kosten- und Leistungsparametern die sich im Vergleich der Antriebsstrangkonzepte im Wesentlichen unterscheiden. So werden für die Berechnung des Energieverbrauchs die Einzelwirkungsgrade der Komponenten, für die Bauraum- und Gewichtsanalyse die gravimetrischen und volumetrischen Leistungs- bzw. Energiedichten der Komponenten und für die Berechnung der Investitionskosten die Herstellungskosten der Komponenten benötigt. An gegebener Stelle werden die Parameter an die besonderen Anforderungen für schwere Nutzfahrzeuge und damit segmentspezifisch differenziert.

3.3.1 Verbrennungsmotorische Antriebseinheit

Stand der Technik bei Diesel-Nutzfahrzeugen ist heute ein wassergekühlter Hubkolbenmotor mit zwei obenliegenden Nockenwellen (DOHC), der meist zentral vorne im Fahrzeug platziert ist und die erzeugte Antriebskraft über eine Gelenkwelle auf die Hinterachse überträgt. Der Dieselkraftstoff wird über ein (modulares) Common-Rail-Einspritzsystem mit einem Druck von bis zu 2.200 bar direkt eingespritzt (HPDI, High Pressure Direct Injection). Der effektive Wirkungsgrad des **Dieselmotors** mit einem Hubraum bis 2.998 cm³, siehe Tabelle 4 leichte Nutzfahrzeuge N1, beträgt im Bestpunkt 42% und ab einem Hubraum von 2.998 cm³, siehe Tabelle 4 schwere Nutzfahrzeuge N2+N3, 47% [140, 141]. Zur Erfüllung der Abgasnorm EURO 6(d) besteht das Abgasnachbehandlungssystem (ABG-System) aus Dieseloxidationskatalysator, Dieselpartikelfilter, SCR-Katalysator (Selective Catalytic Reduction) mit Harnstoffzusatz (AdBlue) und Ammoniak-Schlupfkatalysator [48, 142].

Mit der Einführung der **Euro-7-Abgasnorm**, voraussichtlich ab 2027 für Pkws und LNF (N1) und ab 2029 für SNF (N2+N3), sollen die Grenzwerte insbesondere für Stickoxide, Kohlenmonoxide und Feinpartikeln nochmal deutlich gesenkt werden [143]. Erste technische Lösungsansätze für die Stickoxidreduzierung zeigen, dass der SCR-Katalysator größer dimensioniert und größere Mengen an AdBlue eingesetzt werden sollen (SCR-Technologie mit Doppeldosierung; DI-SCR) [144]. Als erste Abschätzung wird angenommen, dass dies eine Verdopplung der heutigen SCR-Systemkosten nachziehen wird. Zudem werden weitere Optimierung am Dieselmotor hinsichtlich Temperaturmanagement, Turboaufladung und Kraftstoffeinspritzung notwendig sein, die nach derzeitigem Stand noch nicht abgeschätzt werden können [145].

Die Basis des **Erdgasmotors** für leichte Nutzfahrzeuge bildet ein Saugrohrmotor in Monovalenter Betriebsart. Das Erdgas wird mit einem Druck von 9 bar eingespritzt und mittels Kerzenzündung (Spark ignition) verbrannt. Die Abgasnachbehandlung erfolgt über einen 3-Wege-Katalysator. [146] Der effektive Wirkungsgrad des Erdgasmotors liegt im Bestpunkt bei 40% [11]. Aufgrund der Wirkungsgradnachteile des Erdgas-Saugmotor wird bei schweren Nutzfahrzeugen (N2, N3) auf die dieselmotorische Hochdruck-Gasdirekteinspritzung (HPDI) gesetzt. Dabei wird neben Erdgas auch etwas Dieselkraftstoff als Zündelement in den Brennraum eingespritzt und unter hohem Druck (200 bis 300bar) direkt verbrannt. Der effektive Wirkungsgrad des HPDI-Erdgasmotors liegt bei 42% [48].

Erste **Wasserstoffverbrennungsmotoren** für den Einsatz in schweren Nutzfahrzeugen befinden sich in der Erprobung [147]. Aufgrund der Effizienzvorteile wird derzeit ein HPDI-Dieselmotor als Basis favorisiert. Erste Messungen an Versuchsmotoren ergaben einen effektiven Motorwirkungsgrad von 40% [148, 149]. Für den Einsatz von Wasserstoff müssen jedoch zahlreiche mechanische

Komponenten modifiziert und im Dauerlauf erprobt werden. Dazu gehören H2-Einspritzsysteme und -Verdichter sowie Kolben, Ein- und Auslassventile. Darüber hinaus ist eine Anpassung der konventionellen Motorsteuerung notwendig. Die zusätzlichen Anschaffungskosten werden derzeit auf 3.000 bis 5.000 $EURO_{2020}$ im Vergleich zu einem Dieselmotor für schwere Nutzfahrzeuge geschätzt. [148, 150] Die Wasserstoffverbrennung findet im mageren Bereich (Lambda >2) statt, so dass im Rohabgas 60% weniger Stickoxide als bei der Dieselreferenz enthalten sind. Durch eine H2-DeNOx Abgasnachbehandlung (SCR-Kat. mit Wasserstoff als Reduktionsmittel) können die Stickoxidemissionen im gesamten Kennfeld[20] weiter auf nahezu null reduziert werden. [151]

Im verbrennungsmotorischen Antriebsstrang kommen bei LNF manuelle Fünf- bis Sechsgang-Handschaltgetriebe als auch automatisierte Stufengetriebe zum Einsatz. Bei SNF werden dagegen in den meisten Fällen vollautomatische Doppelkupplungsgetriebe mit bis zu 16 Gängen eingebaut. Der Getriebewirkungsgrad ist lastpunktabhängig. Für manuelle Getriebe wird ein effektiver Wirkungsgrad von 87% für automatische Getriebe 95% angenommen [56, 152]. Bei konventionellen SNF sind Antriebsmotor und Getriebe aus Platzgründen zentral an der Vorderachse angeordnet. Die Drehkräfte am Getriebeausgang werden über eine Kardanwelle und ein Differentialgetriebe auf die angetriebene Hinterachse weitergeleitet. Der Wirkungsgrad der mechanischen Kraftübertragung liegt zwischen 92 und 98% [56].

Für die beschriebenen verbrennungsmotorischen Komponenten wurden die durchschnittlichen Herstellungskosten sowie die gravimetrische und volumetrische Leistungsdichten auf Basis der Auswertung von Hersteller- und Zuliefererdaten sowie ausgewählter Fachliteratur ermittelt. In Tabelle 12 sind für die spezifischen Eigenschaften der Komponenten der verbrennungsmotorischen Antriebseinheit zusammengestellt.

[20] geringe NOx Emissionen noch unter Volllast und Low-End-Torque [150].

Tabelle 12: Spezifischen Eigenschaften der Komponente der verbrennungsmotorischen Antriebseinheit

	Spezifische Herstellungskosten	Gravimetrische Leistungsdichte	Volumetrische Leistungsdichte	Effektiver Wirkungsgrad
Dieselmotor *Hubraum ≤ 2.998 cm³*	58 $EURO_{2020}$/kW	0,442 kW/kg	319 kW/m³	42%
Dieselmotor *Hubraum > 2.998 cm³*	76 $EURO_{2020}$/kW	0,292 kW/kg	194 kW/m³	47%
Erdgasmotor *Niedrig- bis mitteldruck DI*	52 $EURO_{2020}$/kW	0,383 kW/kg	258 kW/m³	40%
Erdgasmotor *Hochdruck-Direkteinspritzung*	98 $EURO_{2020}$/kW	0,279 kW/kg	216 kW/m³	42%
H2-Motor *Niedrig- bis mitteldruck DI*	82 $EURO_{2020}$/kW [a)]	0,383 kW/kg [b)]	258 kW/m³ [b)]	40%
H2-Motor *Hochdruck-Direkteinspritzung*	113 $EURO_{2020}$/kW [a)]	0,279 kW/kg [b)]	216 kW/m³ [b)]	42%
Diesel-ABG *bzgl. Hubvolumen in cm³*	0,85 $EURO_{2020}$/cm³	78,67 cm³/kg	0,0187 cm³/l	-
Erdgas-ABG *bzgl. Hubvolumen in cm³*	0,33 $EURO_{2020}$/cm³	78,67 cm³/kg	0,0187 cm³/	-
H2-ABG *bzgl. Hubvolumen in cm³*	0,28 $EURO_{2020}$/cm³ [c)]	236,01 cm³/kg [c)]	0,0561 cm³/l [c)]	-
Manuelles Getriebe *bzgl. Motordrehmoment in kg*	2,0 $EURO_{2020}$/Nm	8,05 Nm/kg	12,5 Nm/m³	87%
Automatikgetriebe *Bzgl. Motordrehmoment in kg*	2,48 $EURO_{2020}$/Nm	11,5 Nm/kg	16,6 Nm/m³	95%

[a)] zusätzliche Anschaffungskosten nach [150], zusätzlich zu spezifischen Dieselmotorkosten; [b)] eigene Abschätzung wie Erdgasmotor; [c)] eigene Abschätzung (1/3 von Diesel-ABG)
Quellen: [11, 28, 115, 140, 153–157] sowie Datenblätter und Angaben der Hersteller

3.3.2 Kraftstofftanksystem

Für die Speicherung von Dieselkraftstoff in Nutzfahrzeugen werden aus Gewichtsgründen bevorzugt Aluminiumtanks anstelle von Stahltanks eingesetzt. Für die Gasspeichersysteme (CNG, CH2) in Fahrzeugen eignen sich Drucktanks aus Aluminium (Typ III Behälter) oder Kunststoff (Typ VI Behälter). Beide werden mit Kohlenfaserummantelung verstärkt. Nach [117, 158] geht der Trend aufgrund von Leichtbauvorteilen für alle betrachteten Kompressionsgrößen, also 200 bar CNG, 350 bar CH2 und 700 bar CH2, zum Typ VI Behälter. Die Auslegung der einzelnen Drucktanks ist jedoch aufgrund der Druckanforderungen unterschiedlich, so dass sich die technischen und ökonomischen Parameter unterscheiden. LNG oder LH2 sind tiefkalte (kryogene) Flüssigkeiten die in vakuumisolierten doppelwandigem Edelstahltanks (Kryotanks) gespeichert werden. Kyrotanks bieten eine bessere

Isolierfähigkeit. Die Herstellungskosten werden allerdings höher eingestuft als Typ 4 Tanks. [159]

Auf der Basis der Auswertung von Herstellerangaben und ausgewählter Fachliteratur wurden Mittelwerte der spezifischen Herstellungskosten und Energiedichten der verschiedenen Kraftstofftanksysteme ermittelt, die in Tabelle 13 zusammengefasst sind. Es ist zu erkennen, dass bei der Speicherung von Flüssigkraftstoff vor allem eine höhere volumetrische Energiedichte erreicht werden kann, was Vorteile für die Fahrzeugauslegung mit sich bringt. So beanspruchen CNG-Tanks etwa einen Faktor 2 mehr den Bauraum als LNG-Tanks. Allerdings führt die komplexe Auslegung des Kryro-Speichersysteme, insbesondere durch die notwendige Wärmeisolierung, zu höheren Systemkosten. Druckgastanks ermöglichen eine nahezu verlustfreie Speicherung des Kraftstoffs. Während im Falle von LH2-Tanks bei längeren Standzeiten Abdampfverluste[21] zu berücksichtigen sind. Die wiederum bei hoher Fahrzeugauslastung und damit kontinuierlicher Temperierung, vernachlässigbar sind.

Tabelle 13: Spezifische Eigenschaften verschiedener Kraftstofftanksysteme (ohne Kraftstoff)

Fahrzeugtank	**Tank-Typ**	**spezifische Herstellungskosten**	**Gravimetrische Energiedichte**	**Volumetrische Energiedichte**
Diesel-Tank	Aluminium	2,0 $EURO_{2020}/l_D$	10,91 l_D/kg	885 l_D/m^3
CNG-Tank	Typ 3 (Metall; Karbonfaser)	49,2 $EURO_{2020}/kg_{CNG}$ *	0,631 Kg_{NG}/kg	175 Kg_{NG}/m^3
LNG-Tank	Kryotank (Stahl; Vakuum-iso)	53,1 $EURO_{2020}/kg_{LNG}$ *	1,0 Kg_{NG}/kg	302 kg_{NG}/m^3
CH2-Tank (350bar)	Typ 3 (Metall; Karbonfaser)	350,8 - 872,8 $EURO_{2020}/kg_{H2}$	0,034 Kg_{H2}/kg	16,2 kg_{H2}/m^3
CH2-Tank (700bar)	Typ 4 (Kunststoff; Karbonfaser)	415,1 - 1052,3 $EURO_{2020}/kg_{H2}$	0,050 Kg_{H2}/kg	26,7 kg_{H2}/m^3
LH2-Tank	Kryotank (Stahl; Vakuum-iso)	*Keine Angabe verfügbar*	0,066 kg_{H2}/kg	34,5 kg_{H2}/m^3

Quelle: [29, 137, 160–163] sowie Datenblätter und Angaben der Hersteller

* basiert auf Abschätzungen in Fachliteratur

[21] Siedender Wasserstoff verdampf, weshalb der Druck und die Temperatur im Behälter steigen. Bei Erreichen des maximal zulässigen Drucktanks (Boil-off-Druck) wird über eine Sicherheitsventil Wasserstoff angeblasen. Was als Abdampfverlust definiert wird, welche bei Fahrzeugtank 1-2% des Tankinhalt pro Tag ausmachen. [78].

3.3.3 Elektrischer Antriebseinheit und Brennstoffzellensystem

Typischerweise beträgt die Niedervolt-Bordspannung bei leichten Nutzfahrzeugen 12 V und bei schweren Nutzfahrzeugen 24 V [164]. Für elektrische Antriebe ist ein Hochvolt-Bordnetz erforderlich. Der Trend geht dabei insbesondere bei schweren Nutzfahrzeugen direkt zu Systemspannungen bis 1.200 V hoch, um die notwendige Leistungsdichte zu erreichen. Bei leichten Nutzfahrzeugen ist zunächst ein zunehmender Trend zu 48 V-Systemen im Niedervoltbereich erkennbar, um steigende Nebenverbraucher zunächst effizient zu versorgen, ohne die Anforderungen für Hochvolt-Systeme (> 60 V) zu erfüllen.

Die elektrische Antriebseinheit umfasst die elektrische Maschine, das Getriebe und die Leistungselektronik. Auf Basis der Marktauswertung elektrischer Nutzfahrzeugmodelle stellt der **permanenterregte Synchronmotor** (PMSM) mit einfachen 1- bis 3-Gang-Getrieben in allen betrachteten Nutzfahrzeugsegmenten den Stand der Technik dar. PMSM zeichnen sich durch eine hohe Leistungsdichte sowie je nach Lastbereich durch einen hohen Wirkungsgrad von bis zu 95 % aus [165]. Aufgrund des günstigeren Drehmomentverlaufs eines Elektromotors im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor sind beim diesem weniger Gänge für das Anfahren der verschiedenen Drehzahlbereiche notwendig. Durch die Reduzierung der Gänge können Getriebewirkungsgrade von bis zu 98% erreicht werden [166].

Die **Leistungselektronik** dient der Steuerung und Umwandlung elektrischer Spannungen und Ströme zwischen den Energiespeichern und -verbrauchern im Fahrzeug. Sie umfasst den Inverter, den Spannungswandler sowie die fahrzeugseitigen Ladeschnittstellen. Um den Gleichstrom aus der Traktionsbatterie in Wechselstrom für den Synchronmotor umzuwandeln, bzw. umgekehrt im generatorischen Betrieb (Rekuperation), ist ein Drehstrom-Inverter erforderlich. Der Spannungswandler (DC/DC-Wandler) transformiert die Spannung der Hochvoltbatterie auf das Niveau des Niedervolt-Bordnetzes zur Versorgung der elektrischen Nebenverbraucher. [165]

Zu der Ladeschnittstellen gehört der On-Board-Ladegerät und die DC-Ladeeinheit. Bei Wechselstromladung wandelt das On-Board-Ladegerät (AC/DC-Gleichrichter) den zugeführten Wechselstrom in Gleichstrom mit der für die Traktionsbatterie erforderlichen Spannung um [86]. Für die Gleichstromladung ist eine DC-Ladeeinheit nach CCS- oder MCS-Standard erforderlich [127]. Die spezifischen Herstellungskosten solcher DC-Ladeschnittstellen lassen sich derzeit mangels serienreifer Produkte insbesondere im MCS-Bereich nur schwer beziffern. Der Hardwareumfang umfasst jedoch typischerweise die Ladebuchse, HV-Schutz- und Sicherheitselemente sowie die Kommunikationsschnittstelle [167]. Da hierbei keine elektrische Umwandlung des Ladestroms im Fahrzeug erfolgt, treten nahezu kaum Energieverluste auf (Wirkungsgrad in etwa 99 %). Der Wirkungsgrad des Inverters

beträgt 97 %, der des Wechselrichter 95 % und der des AC On-Board-Ladegerät 93% [168]. Aus laderaumtechnischen Gründen wird die elektrische Antriebseinheit bei leichten Nutzfahrzeugen (N1) als (Front-)Achsantrieb und bei schweren Nutzfahrzeugen (N2, N3) als Zentralantrieb platziert [169]. Die Marktauswertung zeigt jedoch, dass erste elektrische SNF-Modelle auch über Achsantriebe angetrieben werden.

Das **Brennstoffzellensystem** wandelt die chemische Energie des gespeicherten Wasserstoffs in elektrische Energie (DC) für die Antriebseinheit um. Für Fahrzeuganwendungen wird die Niedertemperatur-Polymerelektrolyt-Membran-Brennstoffzelle (NT-PEM-BZ) am häufigsten eingesetzt, mit Elektrode aus Graphit-Polymer-Verbundwerkstoff [170]. Diese bietet gegenüber anderen Alternativen eine hohe Leistungsdichte und einen hohen Wirkungsgrad bei niedriger Betriebstemperatur [152]. Der Wirkungsgrad der NT-PEM-BZ auf Systemebene liegt bei 62%. Ein kritischer Faktor für den Einsatz von Brennstoffzellen in Fahrzeug ist die Lebensdauer. Nach [140] erreichen NT-PEM-BZ eine Lebensdauer von 25.000 h. [171]

In Tabelle 14 sind die durchschnittlichen leistungsspezifischen Herstellungskosten sowie die Leistungsdichten der Komponenten auf Basis der Auswertung von Hersteller- und Zuliefererdaten sowie weiterer Fachstudien zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 14: Spezifische Eigenschaften der Komponenten der elektrischen Antriebseinheit

	Spezifische Herstellungskosten	**Gravimetrische Leistungsdichte**	**Volumetrische Leistungsdichte**	**Effektiver Wirkungsgrad**
Elektromotor (PSM) In Abhängigkeit der elek. Leistung	10,6 $Euro_{2020}/kW_{el}$	4 kW_{el}/kg	8000 kW_{el}/m^3	0,93
Inverter In Abhängigkeit der elek. Leistung	3,1 $Euro_{2020}/kW_{el}$	13 kW_{el}/kg	17.000 kW_{el}/m^3	0,93
Spannungswandler In Abhängigkeit der elek. Leistung	14,7 $Euro_{2020}/kW_{el}$	0,75 kW_{el}/kg	1.200 kW_{el}/m^3	0,95
Ladegerät In Abhängigkeit der Ladeleistung	70,4 $Euro_{2020}/kW_{LL}$	0,8 kW_{LL}/kg	500 kW_{LL}/m^3	0,93
Brennstoffzellensystem In Abhängigkeit der elek. Leistung	169,1-227,8 $Euro_{2020}/kW_e$	0,28 kW_{el}/kg	300 kW_{el}/m^3	0,6
Quellen: [11, 84, 140, 141, 156, 168, 172–174]				

3.3.4 Batteriesystemtypen

Als elektrochemischer Energiespeicher für elektrische Nebenverbraucher und Sicherheitsfunktionen werden in leichten Nutzfahrzeugen 12 V oder 14 V und in schweren Nutzfahrzeugen 24 V Bleisäurebatterien eingesetzt. Als Traktionsspeicher für Elektrofahrzeuge hat sich aufgrund der hohen Energie- und Leistungsdichte sowie der hohen Zellspannung die Lithium-Ionen-Batterie durchgesetzt [164]. Derzeitige Bordnetzspannungen für batterie-elektrische leichte Nutzfahrzeug und Pkw liegen bei 800 V, während für batterie-elektrische schwere Nutzfahrzeug zwischen 1.000 und 1.200 V [175].

Für die Auslegung von Batteriesystemen in elektrischen Fahrzeugen ergeben sich mehrere zentrale Anforderungen an die Batterietechnologie. Insbesondere im Nutzfahrzeugbereich sind dabei primär folgende Spezifikationen zu berücksichtigen: gravimetrische und volumetrische Energiedichte , Zyklenfestigkeit, sowie Kosten. Eine weitere Differenzierung in der Auslegung der Batteriesysteme bzw. der zugrunde liegenden Batteriezellen ergibt sich in Abhängigkeit vom jeweiligen Antriebskonzept. Während für hybrid-elektrische Antriebskonzepte leistungsoptimierte Hochleistungszellen erforderlich sind, kommen für batterie-elektrische Antriebskonzepte energieoptimierte Hochenergiezellen zum Einsatz. Die in Tabelle 15 dargestellten Anforderungen beziehen sich auf die in dieser Arbeit betrachteten Spezifikationen und stellen deren aktuelle Ausprägungen für Hochenergie- und Hochleistungszellen auf Basis der Literatur dar.

Tabelle 15: Spezifische Eigenschaften der Hochenergie- und Hochleistungsbatteriepack

	Hochenergiebatterie	**Hochleistungsbatterie**
Effektiver Wirkungsgrad (System)	0,95	
Gravimetrische Energiedichte Wh/kg	150-220	35-70
Volumetrische Energiedichte Wh/l	200-320	60-120
Spezifische Herstellungskosten Euro$_{2020}$/kWh	154-361	219-512
Zyklen-Lebensdauer bei 80% DOD	3.500	

Quelle: [176–181]

In den derzeitigen batterieelektrischen Nutzfahrzeugen kommen überwiegend Hochenergiezellen zum Einsatz, mit Kathodenmaterial Lithium-Eisenphosphate (LFP) und Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxide (NMC) [181]. LFP-Batterien sind insbesondere aus Kostengründen die geeignetere Alternative und hinsichtlich der kalendarischen Alterung (LFP: 3.000 bis 5.000 Zyklen, NMC: 1.500 bis 3.500 Zyklen) etwas stabiler als NMC-Batterien [152]. So waren LFP-Zellen im Jahr 2020 32% günstiger als NMC Batterien [182]. NMC-Batterien bieten eine höhere Leistungs- und Energiedichte (Gravimetrische Energiedichte Wh/kg: 125 (LFP) 170 (NMC), Volumetrische Energiedichte Wh/l: 190 (LFP) 239 (NMC). Der aktuelle Trend ist nicht

eindeutig für NMC. ExpertInnen gehen allerdings davon aus, dass LFP-Batterien insbesondere für kostenempfindliche Anwendungen, wo eine geeignete Fahrzeugreichweite auch über die LFP-Batterien erreicht werden kann, ebenfalls Potential haben kann [183].

3.4 Parametrisierung von Automatisierungs- und Vernetzungskomponente

Zu den primären Fahraufgaben eine Fahrzeuges gehören Führung, Navigation und Stabilisierung [184]. Automatisierungs- und Vernetzungssysteme ermöglichen die teilweise oder vollständige Übernahme dieser Fahraufgaben und damit auch die Verantwortung der bisher menschlichen Fahrzeugführung. Dabei werden nach der SAE Norm J3016[22] sechs Automatisierungsstufen unterschieden: keine Automatisierung (Stufe 0), Fahrerassistenz (Stufe 1), Teilautomatisierung (Stufe 2), bedingte Automatisierung (Stufe 3), Hochautomatisierung (Stufe 4), Vollautomatisierung[23] (Stufe 5). Einzelne Automatisierungsstufen lassen sich hinsichtlich ihrer Funktionalität und Produktausstattung spezifizieren. In Abbildung 12 sind für verschiedene Automatisierungsfunktionen die erforderlichen Fahrzeugkomponente und -systeme in einer funktionalen Architektur skizziert. Hierzu zählen die Umfeldsensorik zur Objekterkennung, Navigationssysteme zur Selbstlokalisierung, Vernetzungssysteme für den Informationsaustausch mit anderen Verkehrsteilnehmern und/oder der Infrastruktur, Steuergeräte zur Verarbeitung der erfassten und kommunizierten Daten und schließlich die Fahrzeugaktorik zur Ausführung elektronischer Fahrbefehle in Quer- und Längsbewegungen des Fahrzeugs. Dabei müssen nicht alle Funktionen und dementsprechende Produkte im Fahrzeug verbaut werden. Der aktuelle Trend in der Nutzfahrzeugindustrie geht allerdings von einer fahrzeuggesteuerten bzw. -zentrierten Automatisierung aus. Dies bedeutet, dass automatisierte Fahrzeuge in der Lage sein müssen, im Verkehr autark Daten zu erfassen, auszuwerten und in Bewegungen zu übersetzen. Der Fokus in dieser Arbeit liegt daher auf der fahrzeugseitigen Ausstattung und Optimierung der Automatisierungs- und Vernetzungssysteme.[24] In den folgenden Unterkapiteln werden die grundlegenden Komponenten und Systeme zur Automatisierung und Vernetzung

[22] Die am häufigsten zitierte internationale Stufeneinteilung für die Fahrautomatisierung ist die SAE Norm J3016. Eine Gegenüberstellung mit anderen international gebräuchlichen Einstufungen der Fahrautomatisierung findet sich in [67].

[23] Auch als autonomes Fahren genannt

[24] Alternative Ansätze verfolgen, dass Daten weitgehend kooperativ mit anderen Verkehrsteilnehmern oder infrastrukturseitig erfasst und/oder extern (z.B. über eine Cloud – virtuelle Fahrersoftware) ausgewertet werden. In höheren Ausbaustufen kann die Fahrzeugführung auch extern (über eine Steuerzentrale) gesteuert werden.

vorgestellt und nach dem Stand der Technik parametrisiert. Dabei liegt der Fokus auf Kosten- und Performanzparameter.

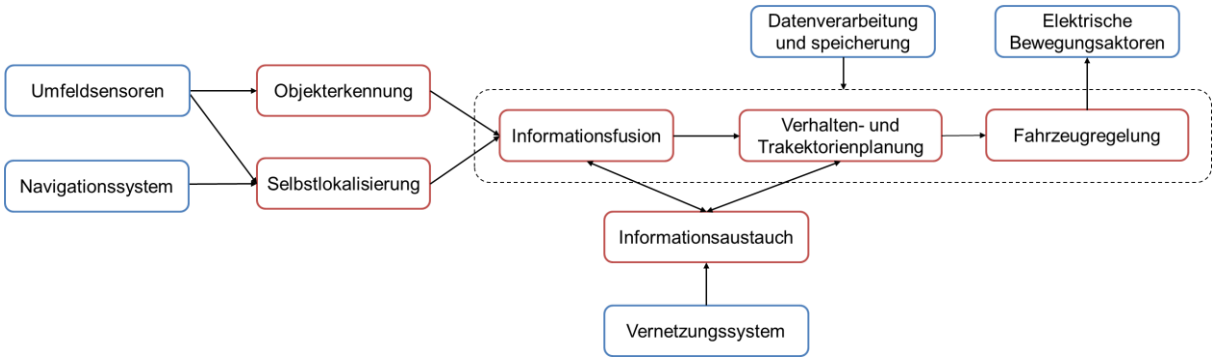


Abbildung 12: Funktionale Architektur automatisierter und vernetzter Fahrzeuge (Eigene Darstellung in Anlehnung an [185])

3.4.1 Umfeldsensorik

Eine Mehrheit der erforderlichen Umfeldsensoren ist in Nutzfahrzeugen bereits im Einsatz. Dazu gehören **Ultraschallsensoren**, die auch bei eingeschränkter Sichtverhältnissen, wie Dunkelheit oder Nebel, Abstandsinformationen im Nahbereich bis 5,5 m liefern. Sie besitzen große Detektionswinkeln von bis zu 140°, sodass sich mit wenigen Sensoren eine Rundumerfassung für Manövrierbewegungen auf engem Raum (z. B. Rangieren/Einparken) realisieren lässt. In Nutzfahrzeugen gehören diese zur Standardausrüstung.

Zur Erkennung und Klassifizierung von Objekten im Fahrzeugumfeld, wie Fahrbahnmarkierungen beim Spurverlassenwarner oder Verkehrszeichen beim intelligenten Geschwindigkeitsassistenten, werden neben Farbinformationen auch Textur- und Kontrastinformationen benötigt, die insbesondere von **Multifunktionskameras**[25] erfasst werden [186]. Multifunktionskameras liefern in einfacher Ausführung (Mono) Informationen über Entfernungen und Geschwindigkeiten, woraus sich Abstandsinformationen ableiten lassen. Stereo-Multifunktionskameras hingegen besitzen zwei Kameras, die in unterschiedlichen Winkeln angeordnet sind, so dass ein 3D-Bild von der Fahrzeugumgebung erzeugt werden kann [186]. Allerdings ist die Detektionsweite der Stereo-Multifunktionskamera kleiner und die Herstellungskosten höher als bei Mono-Multifunktionskameras (siehe Tabelle 16). Im Vergleich zu den anderen Umfeldsensoren ist der hohe

[25] Kamera inkl. einer Software die auf Methoden der künstlichen Intelligenz setzt zur klassischen Bildverarbeitung

Energieverbrauch der Multifunktionskameras, insbesondere für die integrierte Bildverarbeitungssoftware, hervorzuheben.

Bei schwierigen Sichtverhältnissen, wie Dunkelheit, Nebel oder Schnee ist die Zuverlässigkeit von Multifunktionskameras zur Abstandserkennung eingeschränkt. Präzisere Abstands- sowie Geschwindigkeitsinformationen liefern **Radarsensoren**[26]. Die Auflösung der Radardaten ist jedoch für eine Objektklassifizierung zu gering. Radarsensoren können daher die Leistungsfähigkeiten von Kameras nicht ersetzten, dienen aber in Kombination mit Kamerasystemen (Sensorfusion) zur zuverlässigen Langstreckendetektion, die insbesondere zur Erfüllung der Sichtweitenanforderungen ab Stufe 3 notwendig wird. Weiterhin wird zwischen Nah- und Fernbereichsradar unterschieden. Nahbereichsradar ermöglicht die Detektion bis 50 m, wie sie beim Notbremsassistent und intelligente Geschwindigkeitsassistent zum Einsatz kommt. Für den Einsatz der genannten FAS bei höheren Geschwindigkeiten und damit höheren Sichtweitenanforderungen werden Fernbereichsradar benötigt. [186]

LiDAR (Light Detection and Ranging Systems) basieren auf der Laufzeitmessung (Time of Flight, ToF[27]). Damit bieten sie rein technisch eine höhere Fernauflösung als Radar und sind zuverlässiger als Kameras bei der Echtzeiterfassung von 3D-Daten der Umgebung. Die Notwendigkeit von LiDAR-Sensoren in automatisierten Fahrzeugen begründet sich daher vor allem aus der präziseren Detektion und schnelleren Entscheidungsfindung, die ab Stufe 3 erforderlich werden. Nachteilig sind die hohen Kosten. Derzeit werden in Forschungsfahrzeugen LiDARs mit rotierendem Spiegel zur 360° Winkelerfassung eingesetzt, die sehr empfindlich auf Erschütterungen reagieren [187]. Für den Massenmarkt werden die wartungsärmeren und kostengünstigeren reinen Festkörper-LiDARs (solid state lidar) erwartet. Auch diese lassen sich hinsichtlich der Reichweite und Detektionswinkel in Nah- und Fernbereichs-LiDAR unterscheiden.

In Tabelle 16 sind für die vorgestellten spezifischen Umfeldsensoren die relevanten technischen Eigenschaften auf Basis aktueller Kenndaten aus Produktdatenblättern der Hersteller sowie die entsprechenden Selbstkosten auf Basis erster Abschätzungen aus der Fachliteratur zusammengefasst.

---

[26] Radarsensoren senden elektromagnetische Welle im Radiofrequenzbereich, die im Vergleich zu schall- und lichtbasierten Sensoren nicht von Umwelteinflüssen beeinflusst werden. [186].

[27] 3D-ToF Sensoren werden auch bei Kamerasystemen eingesetzt

Tabelle 16: Relevante Eigenschaften der Umfeldsensoren

Sensortyp	Selbstkosten in $Euro_{2020}$	mittleres Gewicht in Gramm	Nennleistung in Watt[28]	Mittlere Reichweite in Meter	Mittlere Öffnungswinkel in Grad
Ultraschallsensor	5-15	15	0,5-1	5,5	140°
Multifunktionskamera					
Mono	20-50	210	1-5	550	60°
Stereo	100-500	315	3-12	60	90°
Radarsensor					
Nahbereich	50-100	135	2-7	50	150°
Fernbereich	150-300	315	5-11	150	30°
LiDAR					
Nahbereich	540-1.520	800	5-17	150	73°
Fernbereich	950-3.500	2.557	15-60	300	140°

Quelle: [188–191] sowie Angaben aus Datenblätter

3.4.2 Navigations- und Vernetzungssysteme

Neben der Erfassung der Umgebung ist für die Lokalisierung der Fahrzeugkoordinaten auf einer hochauflösenden 3D-Karte ein Navigationssatellitensystem (Global Navigation Satellite System, GNSS) in Kombination mit einer Inertialmesseinheit (IMU) erforderlich. In der Regel wird hierfür das GPS (Global Positioning System) eingesetzt. Für die zentimetergenaue Positionserfassung werden die GNSS-/IMU-Daten mit Informationen aus der sensorischen Umfelderfassung präzisiert, indem der gemessene Abstand zu den Objekten in der Umgebung mit Daten aus der 3D-Karte abgeglichen wird. [192] Hardwareseitig sind daher ein GNSS-Modul mit Antenne und Empfänger sowie eine IMU notwendig.

Die Kommunikation und Datenübertragung in konventionellen Nutzfahrzeugen erfolgen bisher über Telematiksysteme, die insbesondere für das Flottenmanagement genutzt werden. Die Übertragung geschieht dabei in der Regel über Mobilfunknetze (LTE/5G). Für das vernetzte und automatisierte Fahren wird auf diese bestehende Kommunikationsfähigkeit aufgebaut, jedoch sind dafür weiterentwickelte V2X-Technologien mit direkter Fahrzeug-zu-Fahrzeug- (V2V) und Fahrzeug-zu-

[28] Die Nennleistung der Sensoren wird üblicherweise nicht in Watt angegeben, da die Leistungsfähigkeit der Sensoren in der Regel nicht direkt mit der elektrischen Leistung in Watt zusammenhängt. Für die vergleichende Bewertung mit anderen elektronischen Komponenten, werden dennoch verfügbare Angaben in Watt verwendet.

Infrastruktur-Kommunikation (V2I) erforderlich. [193] Grundsätzlich stehen dafür zwei Technologien zur Verfügung. Über den in Europa gültigen **C-ITS WLAN**[29] Standard können Informationen über lokale Gefahrenmeldungen und Verkehrsflussoptimierungen direkt mit anderen Fahrzeugen (V2V, Vehicle to Vehicle) und der Verkehrsinfrastruktur (V2I; Vehicle to Infrastructure[30]) ausgetauscht werden. [194] Dazu ist ein V2X-Kommunikationsmodul (mit Antenne und Modem) im Fahrzeug erforderlich, und das Fahrzeug muss sich in Reichweite (theoretisch bis zu 1 km, praktisch abhängig von Sichtlinie und Knotendichte) eines WLAN-Knotens befinden, sodass ein flächendeckendes Ad-hoc-Netzwerk entstehen kann. Daher wird auch die Bezeichnung zweckgebundene Nahbereichskommunikation (Dedicated Short Range Communication (DSRC) verwendet. [195]

Für die fahrzeugexterne Kommunikation von Informationen im Langstreckenbereich, wird auf das **Mobilfunknetz** gesetzt. Unter Idealbedingungen ermöglicht die 5G-Technologie hohe Datenübertragungsraten und Latenzen im Millisekundenbereich, was die für das automatisierte Fahren notwendige Echtzeitkommunikation unterstützt. Die Reichweite hängt von der zukünftigen Netzabdeckung ab, ermöglicht aber prinzipiell eine weltweite Vernetzung. Damit stellt die Mobilfunkkommunikation die Grundlage für das umfassende „Vehicle-to-Everything“ (V2X[31], Vehicle to Everything) dar. Wie bei der WLAN-Technologie ist hierfür ein Kommunikationsmodul mit Sende- und Empfangseinheiten erforderlich. Eine detaillierte Übersicht zur Fahrzeugkonnektivität findet sich in [196].

Mit der verpflichtenden Ausstattung aller Neufahrzeuge in der EU ab 2018 mit dem automatischen Notrufsystem eCall sind Mobilfunk-Module bereits Standard. GNSS-Module und IMUs sind ebenfalls Bestandteil der Fahrzeugausstattung [192]. Für höhere Automatisierungsstufen (Stufe 3–5) ist ein zusätzliches V2X-Kommunikationsmodul[32] erforderlich. Hardwareseitig umfasst dies Antennen, Modem und Recheneinheiten sowie Sicherheitskomponenten, die hier zusammenfassend als Kommunikationsmodul betrachtet werden.

---

[29] Der Intelligent Transport Systems (ITS) 5G basierend auf den automobil-spezifischen WLAN (Wireless Local Area Network) Standards IEEE 802.11p. In diesem Zusammenhang wird auch die Bezeichnung Co-operative Intelligent Transport Systems (C-ITS) verwendet

[30] Infrastruktur kann für eine vernetzte Verkehrsinfrastruktur stehen also auch für Satelliten bzw. Vehicle to cloud computing (V2C)

[31] Insbesondere zu FußgängerInnen (Vehicle to Pedestrian, V2P), RadfahrerInnen und anderen nicht vernetzen VerkehrsteilnehmerInnen

[32] Mobilfunk- und WLAN-Kommunikationsmodul sind ähnlich hardwareseitig aufgebaut, keine Unterscheidung hier notwendig!

3.4.3 Datenverarbeitung und -speicherung

Elektronische Systeme in Fahrzeugen werden durch Steuergeräte gesteuert, die über Bussysteme miteinander kommunizieren. Während klassische Systeme auf CAN-Bus-Strukturen basieren, kommen bei höheren Automatisierungsstufen zunehmend Automotive Ethernet und andere Hochgeschwindigkeitsnetzwerke zum Einsatz, um die hohen Datenraten der Umfeldsensoren zu bewältigen [139]. Steuergeräte bestehen wiederum aus einem oder mehreren Computer-Prozessoren (Central Processing Unit (CPU), Graphics Processing Unit (GPU)), die Steuerungs- und Datenverarbeitungsaufgaben übernehmen. Mit steigendem Automatisierungsgrad erhöht sich die Anzahl der zu verarbeitenden Maschinenbefehle und damit auch die Leistung der benötigten Prozessoren. Eine wichtige Kenngröße für die Auswahl geeigneter Prozessoren ist die Rechenleistung, gemessen in Maschinenbefehle pro Sekunde (TOPS, Tera Operations per Second). Der Hersteller NVIDIA beschreibt in [197] die erforderlichen TOPS-Leistungen für verschiedene Automatisierungsstufen und leitet daraus automatisierungsgradspezifische Steuergeräte ab. Für die Teilautomatisierung (Stufe 2) werden Steuergeräte mit vergleichsweise geringer Rechenleistung benötigt, üblicherweise im Bereich von 10 bis 100 TOPS. Mit der Umsetzung der bedingten Automatisierung (Stufe 3) steigt die erforderliche Rechenleistung auf etwa 100 TOPS. Für die hohe und vollständige Automatisierung (Stufe 4–5) liegen die Anforderungen im Bereich von 500 bis über 1.000 TOPS. Auf Basis der Auswertung aktueller Automotive-Prozessoren hinsichtlich ihrer Rechenenergieeffizienz ergibt sich eine Bandbreite von etwa 0,4 bis 2 Watt pro TOPS. [198, 199] Diese Basisparameter wird in dieser Arbeit zur Abschätzung des automatisierungsgradspezifischen Energieverbrauchs der Datenverarbeitung herangezogen (siehe Kapitel 4.2.3).

Parallel dazu steigen die Anforderungen an die Speicherkapazität. Konventionelle Nutzfahrzeuge verfügen bereits über leistungsfähige Festwertspeicher (Flash/SSD) im Terabyte-Bereich [198]. Im Vergleich zu diesen verbauten Kapazitäten stellen die für höhere Automatisierungsstufen anfallenden kumulierten Datenmengen keine besondere Herausforderung dar. Auffällig sind lediglich die anfallenden Datenbandbreiten, da insbesondere Kamerasysteme und Kommunikationsmodule Datenraten im zweistelligen Gbit/s-Bereich erzeugen. Darüber hinaus müssen Daten für Diagnose, Unfallanalyse und Over-the-Air-Updates (OTA) sicher gespeichert werden. Hierfür kommen sogenannte Blackbox-Systeme (Event Data Recorder, EDR) zum Einsatz, deren Ausstattung regulatorisch für Stufe 2+ Fahrzeuge vorgeschrieben ist [200].

Zusätzlich zu den Hardwarekosten spielen die Softwareentwicklungskosten eine zentrale Rolle bei der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen. In Relation zu den Hardwarekosten zeigen Studien, dass die Softwarekosten je nach

Automatisierungsstufe zwischen etwa 10 % und bis zu 60 % der Hardwarekosten eines Fahrzeugs betragen können. [201]

3.4.4 Elektrische Aktuatoren

Für die Automatisierung der Fahrzeugführung müssen die entsprechenden menschlichen Fahrbefehle durch elektrische Steuersignale aus den Fahrzeugsteuergeräten ergänzt und in höheren Automatisierungsstufen vollständig ersetzt werden. Diese Signale werden in den jeweiligen elektrischen Aktuatoren umgesetzt. Die by-Wire-Technik bezeichnet die Übertragung der Fahrbefehle über elektronische Signalpfade anstelle mechanischer oder hydraulischer Verbindungen. Dabei wird zwischen den Funktionen elektrisches Lenken (Steer-by-Wire), elektrisches Bremsen (Brake-by-Wire), elektrisches Schalten (Shift-by-Wire) und elektrisches Beschleunigen (Throttle-by-Wire) unterschieden [202]. Die Kombination dieser Funktionen führt zu einen vollelektrischem Fahrzeugsteuerungssystem, welches als **x-by-wire** System bezeichnet wird [203].

Für die Shift-by-Wire-Funktion ist bei Nutzfahrzeugen ein Automatikgetriebe ausreichend, da die Gangwahl bereits durch ein elektronisches Getriebesteuergerät erfolgt [204]. Auch das elektrische Fahr- bzw. Gaspedal, das unter anderem für die adaptive Geschwindigkeitsregelung benötigt wird, gehört heute zur Standardausstattung von Nutzfahrzeugen [188]. Dagegen arbeitet die Nutzfahrzeugindustrie aktuell an der Einführung von Steer-by-Wire (SbW)- und Brake-by-Wire (BbW)-Systemen, die für höhere Automatisierungsstufen erforderlich sind. Erste Anforderungen an ein SbW-System sind in der Norm DIN 70065:2024-05 festgelegt.

Die konventionelle Betriebsbremsanlage von Nutzfahrzeugen funktioniert über das Bremspedal, das bei leichten Nutzfahrzeugen durch elektromechanische oder elektrohydraulische Bremskraftverstärker und bei schweren Nutzfahrzeugen durch elektropneumatische Systeme unterstützt wird. Beim konventionellen Lenksystem wird die Drehbewegung am Lenkrad über hydraulische oder elektrohydraulische Servolenkungen verstärkt. [56, 205] Diese elektrischen Brems- und Lenkkraftverstärker erlauben zwar, dass elektronische Steuersignale in mechanische Bewegungen einfließen, stellen jedoch noch keine echten x-by-Wire-Systeme dar, da die hydraulischen oder pneumatischen Übertragungssysteme die elektronische Steuerung überlagern. Um elektrische Steuersignale vollständig in mechanische Bewegungen umsetzen zu können, sind rein elektrische Aktuatoren erforderlich [206]. Bremsaktuatoren können direkt an den Rädern und Lenkaktuatoren anstelle von Lenkgetriebe und Spurstangen eingesetzt werden. [207] Für eine grobe Parametrisierung der benötigten Aktuatoren können die Eigenschaften industrieller

Elektromotoren herangezogen werden; vereinfachend wird hier ein Leistungsbedarf von etwa 2 kW sowohl für den Lenkaktuator als auch für jeden Bremsaktuator pro Rad angenommen. Der Einsatz der Dreh- und Linearaktuatoren erfordert zudem elektronische Sensoren zur Erfassung der Fahrdynamik, wie z.B. Raddrehzahlsensoren, Lenkwinkelsensoren, Beschleunigungssensoren und Bremsdrucksensoren. [188]. Schließlich gelten echte x-by-Wire-Systeme als notwendige Voraussetzung für Automatisierungsstufen Stufe 4 und 5 [203, 204].

In Tabelle 17 sind die ermittelten Eigenschaften des Kommunikationsmodul, Steuergeräts, Festwertspeichers, relevante Komponente eines konventionellen und elektrischen Brems und Lenksysteme zusammengefasst.

Tabelle 17: Eigenschaften des Kommunikationsmodul, Speichers, Steuergerät und Aktorik für die Auslegung von Automatisierungssystemen

	Selbstkosten in $EURO_{2020}$	**Gewicht in Gramm**	**Nennleistung in Watt**
GNSS-Modul + IMU	90-180	vnl	vnl
C2X Kommunikationsmodul	100-270	0,4	2-8
Festwertspeicher	20-185	0,2	2-20
Steuergeräte für Assistenzsysteme	100-150	vnl	15-40
Zentraler Recheneinheit **(**ab Stufe 3)	450-2.500	vnl	130-750
Elektrische Vakuumpumpe (Bremskraftverstärker je Rad)	800 (Annahme)	4,5	10-30 (Grundlast) 200-500 (Spitzenlast)
Elektrohydraulische Servolenkung	250 (Annahme)	46	30-80 (Grundlast) 200-800 (Spitzenlast)

Quelle: [189, 197, 204, 208–211]

Zudem für Human-Machine-Interface (HMI) 174 Euro und Verkabelung 208 auf Basis von [212] angenommen

4 Einsatzspezifische Auslegung und Bewertung von antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifischer Nutzfahrzeugkonzepte

Eine zentrale Herausforderung bei der Konzeption klimafreundlicher Nutzfahrzeugkonzepte besteht in den wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen Antriebs-, Energie- und Automatisierungssystemen. So beeinflusst die Wahl des Energieträgers die Auslegung des Antriebsstrangs, während der Automatisierungsgrad zusätzliche Anforderungen an Energiebedarf und betriebliche Abläufe stellt. Darüber hinaus ist die Einsatzfähigkeit eines Nutzfahrzeugs wesentlich von der Verfügbarkeit und Integrationsfähigkeit geeigneter Tank- und Ladeinfrastrukturen abhängig. Insbesondere bei batterieelektrischen Antriebskonzepten stellt der Aufbau geeigneter Ladestrategien einen zentralen Bestandteil der Auslegung dar. Automatisierte Fahrsysteme erhöhen diese Komplexität zusätzlich, da sie weitere Anforderung an den Energiebedarf und damit an die Auslegung des Energiespeichers stellen. Ein zentrales Element der Auslegung ist daher die Betrachtung systemischer Zusammenhänge zwischen Fahrzeugkonfiguration, Einsatzprofil, Energiebedarf und der Verfügbarkeit geeigneter Energieinfrastruktur.

Ziel dieses Kapitels ist es somit, Nutzfahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung energie-, antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifischer sowie einsatzspezifischer Anforderungen integriert und systemisch auszulegen. Ausgehend von den Merkmalen der jeweiligen Transportaufgabe und dem zugehörigen zeitlichen Einsatzprofil erfolgt zunächst eine strukturierte Ableitung des betrieblichen Rahmens (Kapitel 4.1). Darauf aufbauend werden Fahrzeugkonfigurationen ausgelegt, unter Berücksichtigung verschiedener Kraftstoffoptionen, Antriebsstrangkonzepte und Automatisierungskonzepte (Kapitel 4.2). Die daraus resultierenden Fahrzeugeigenschaften sowie Nutzeranforderungen im Hinblick auf Energieverbrauch, Energiespeicher und Infrastruktur werden in den folgenden Abschnitten durch die Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs (Kapitel 4.3) sowie die systemische Dimensionierung der Energiespeicherkapazität unter Berücksichtigung infrastruktureller und einsatzspezifischer Rahmenbedingungen (Kapitel 4.4) vertieft.

4.1 Definition der Transportaufgaben und des zeitlichen Einsatzprofils

Zur Beschreibung der einsatzspezifischen Rahmenbedingungen für die Bewertung von Nutzfahrzeugen wird zwischen typischen Transportaufgaben unterschieden. In Anlehnung in [11] werden als wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen den Transportaufgaben die Einzelstrecken-Entfernungsstufen herangezogen, mit

Differenzierung des Gütertransport nach Nah-, Regional- und Fernbereich. Diese Einteilung entspricht auch den klassischen Entfernungsstufen, die in der amtlichen Statistik des Straßengüterkraftverkehrs verwendet werden, mit Nahbereich bis 50 km, Regionalbereich 51 bis 150 km und Fernbereich über 151 km (siehe Kapitel 2.3.2). Weitere Merkmale des Nutzungsprofils der Fahrzeuge werden zur Differenzierung zwischen den Transportaufgaben herangezogen. In Tabelle 18 sind die wesentlichen Unterscheidungsmerkmal zwischen den Transportaufgaben aufgelistet.

Tabelle 18: Beispielhafte Ausprägung wesentlicher Merkmale der Transportaufgabe (eigene Darstellung auf Basis von [11])

	Transportaufgabe	**Gütertransport im Nahbereich**	**Gütertransport im Regionalbereich**	**Gütertransport im Fernbereich**
Entfernungsbereich		Bis 50 km	51-150 km	Über 151 km
Nutzungsprofil	Gravimetrische Auslastung	*z.B. 40%*	*z.B. 80%*	*z.B. 70%*
	Volumetrische Auslastung	*z.B. 90%*	*z.B. 50%*	*z.B. 70%*
	Jahresfahrleistung	*z.B. 40.000km*	*z.B. 60.000km*	*z.B. 100.000 km*
	Tagesfahrleistung	*z.B. 150km*	*z.B. 230km*	*z.B. 380km*
	Anzahl der täglichen Einzelfahrten	*z.B. 5*	*z.B. 7*	*z.B. 1*
	Streckenanteile / Fahrprofilanteile (Urban – regional - Autobahn)	*z.B. 85%-15%-0%*	*z.B. 15%-70%-15%*	*z.B. 0%-15%-85%*
	Tägliche Lenkzeit	*z.B. 5 h*	*z.B. 7,5 h*	*z.B. 9 h*
	Tägliche Bereitschaftszeit	*z.B. 3 h*	*z.B. 2 h*	*z.B. 1 h*
	Einsatztage im Jahr	*z.B. 302*	*z.B. 302*	*z.B. 250*

Als Erweiterung zu der Methodik in [11] sind in dieser Arbeit auch die Einsatzzeiten der Nutzfahrzeuge in die Charakterisierung der Transportaufgabe mit einbezogen. Dies ermöglicht den Zeit-betrieblichen Ablauf der Transportaufgabe bei der Bewertung der Fahrzeugkonzepte zu berücksichtigen. Grundsätzlich gilt hierbei gemäß der EU-Lenkarbeitszeit-Richtlinien im Güterbeförderungsgewerbe (Verordnung (EG) Nr. 561/2006) für Fahrer aller Nutzfahrzeuge[33] eine tägliche Ruhezeit von mindestens 11 Stunden zwischen zwei Tagesfahrten sowie eine Pause von 45 Minuten nach 4,5 Stunden Lenkzeit. Die maximal zulässige Tageslenkzeit beträgt dabei 9 Stunden (bzw. zweimal wöchentlich 10 Stunden). Neben der Lenkzeit kennzeichnet auch die Bereitschaftszeit die spezifische Transportaufgabe. Dies ist die Zeit, in der sich der Fahrer in Bereitschaft befindet, aber nicht aktiv lenkt, wie z.B. bei Stand- und

[33] gelten für Nutzfahrzeuge über 3,5t

Wartezeiten vor der Be- und Entladezone oder in einer längeren Warteschlange. [213] Abbildung 13 zeigt das Zeitprofil einer typischen Transportaufgabe mit den Fahreraktivitäten.

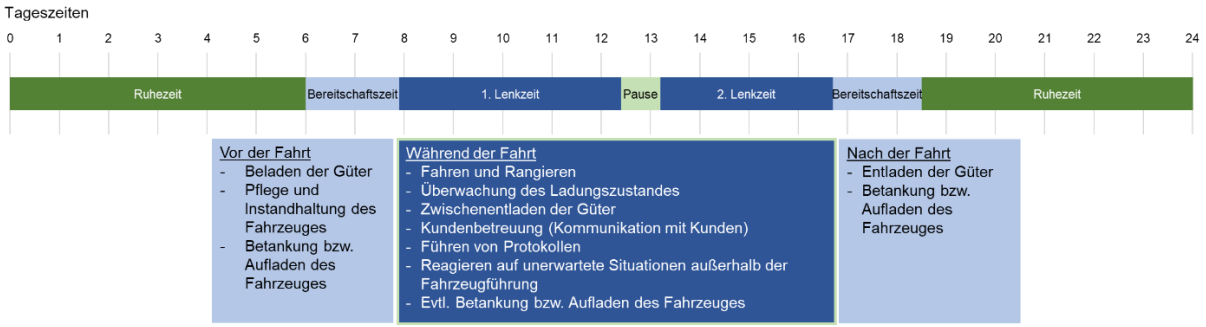


Abbildung 13: Zeitliches Profil einer typischen Transportaufgabe mit menschlichen Aktivitäten (eigene Darstellung)

Um die Komplexität des Betriebsablaufs (Tourenvariabilität) und die hinter der Transportaufgabe stehende logistische Struktur besser quantifizieren zu können, wird die Anzahl der täglichen Einzelfahrten zur Ableitung der Fahrtenart herangezogen. Bei der Art der Fahrten im gewerblichen Straßengüterkraftverkehr wird vereinfacht zwischen Einzelfahrten und Abschnittsfahrten unterschieden [49]. Einzelfahrten umfassen in der Regel nur ein Transportziel ohne logistische Zwischenstopps während der Fahrt, z.B. Pendel- und Shuttlefahrten zwischen Depots oder Umschlagplätzen. Abschnittsfahrten sind dagegen durch mehrere Ziele mit logistischen Zwischenhalten gekennzeichnet, wie sie bei Sammel- und Verteilfahrten oder im Linienverkehr vorkommen [49].

Neben der Darstellung des zeitlichen Einsatzprofils mit ausschließlich menschlichen Aktivitäten wird im Folgenden die Integration automatisierter Fahrfunktionen und Ladezeiten innerhalb des betrieblichen Ablaufs skizziert. Abbildung 14 zeigt den Vergleich der zeitlichen Einsatzprofile einer typischen Transportaufgabe mit menschlicher Fahrzeugführung und mit integriertem autonomen Fahrbetrieb unter Einbeziehung der Ladezeiten. Diese Erweiterung ermöglicht eine differenzierte Analyse der zeitlichen Verschiebungen zwischen aktiver Lenk-, Bereitschafts- und Ruhezeit infolge teil- oder vollautonomer Fahrfunktionen. Während beim konventionellen Betrieb die Fahrzeit vollständig der Lenkzeit entspricht, kann durch den Einsatz autonomer Systeme potentiell Arbeitszeit eingespart werden. Dadurch verändern sich sowohl die zeitliche Struktur der Transportaufgabe als auch die potenzielle Fahrzeugverfügbarkeit. Näheres hierzu in Kapitel 5 im Rahmen der Ökonomischen Bewertung von Nutzfahrzeugkonzepten.

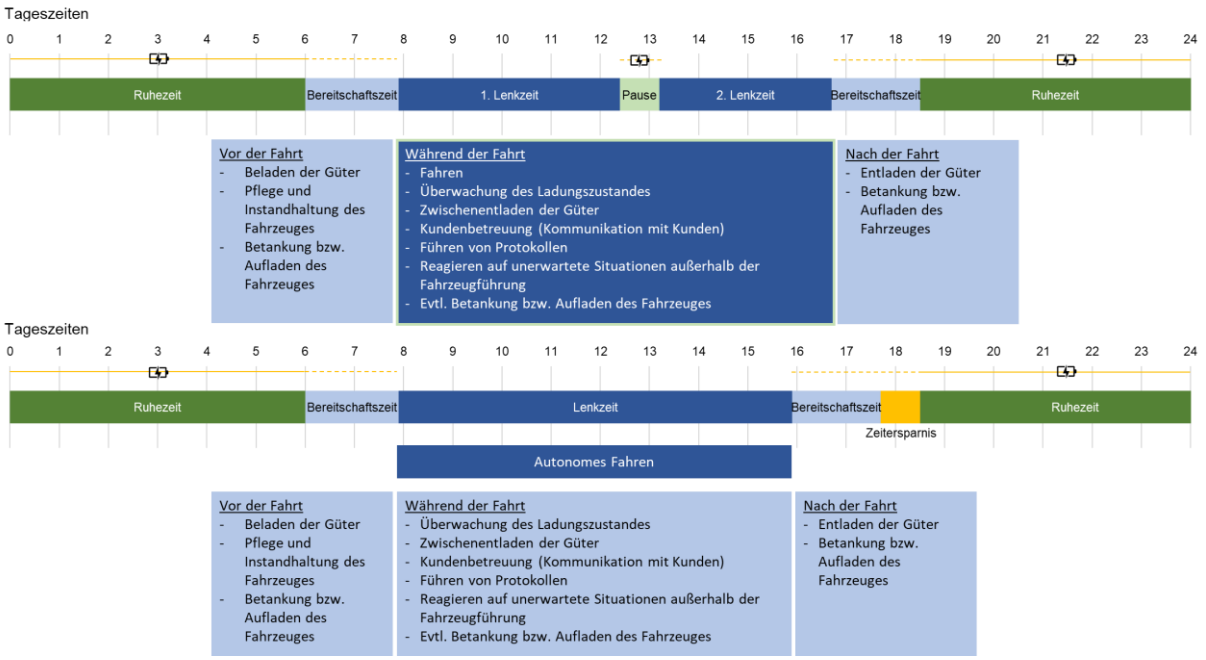


Abbildung 14: Vergleich der zeitlichen Einsatzprofile einer typischen Transportaufgabe mit menschlicher und autonomer Fahrzeugführung unter Berücksichtigung von Ladezeiten (eigene Darstellung)

4.2 Konzeption von antriebstrang- und automatisierungsgradspezifischer Fahrzeugkonfigurationen

Aufbauend auf den Anforderungen der jeweiligen Transportaufgabe bzw. des Haupteinsatzbereichs erfolgt die integrierte und einsatzspezifische Auslegung der betrachteten Nutzfahrzeugkonzepte. Diese basiert auf einer systematischen Kombination von Kraftstoffarten (Energieträgerarten), Antriebsstrangkonzepten und Automatisierungskonzepten, wie in Abbildung 15 dargestellt. Über die gesamte Arbeit hinweg werden dafür folgende Indizes eingeführt: i = Segment, j = Energieträger, k = Antriebsstrang, l = Automatisierung.

Zunächst werden durch eine differenzierte Betrachtung der Energieträger als eigenständige Technologieoption mögliche Kombinationen aus Kraftstoff- und Antriebsstrangarten auf Basis ihrer technischen Kompatibilität abgeleitet (Kapitel 4.2.1). Im Anschluss erfolgt die Dimensionierung der verbrennungsmotorischen, hybriden und elektrischen Antriebsstrangkonzepte (Kapitel 4.2.2), insbesondere hinsichtlich des Leistungsbedarfs und der jeweiligen Wirkungsgradketten. Darauf aufbauend werden die Automatisierungskonzepte dimensioniert (Kapitel 4.2.3), wobei die erforderlichen Systemkomponenten, deren Energiebedarf sowie funktionale Anforderungen in Abhängigkeit vom angestrebten Automatisierungsgrad hergeleitet werden. Schließlich führt die Variation der möglichen Kombinationen aus den genannten Teilsystemen mit einem segmentspezifischen Basisfahrzeugkonzept,

analog zu einem Baukastenprinzip, zur Synthese antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifischer Nutzfahrzeugkonzepte.

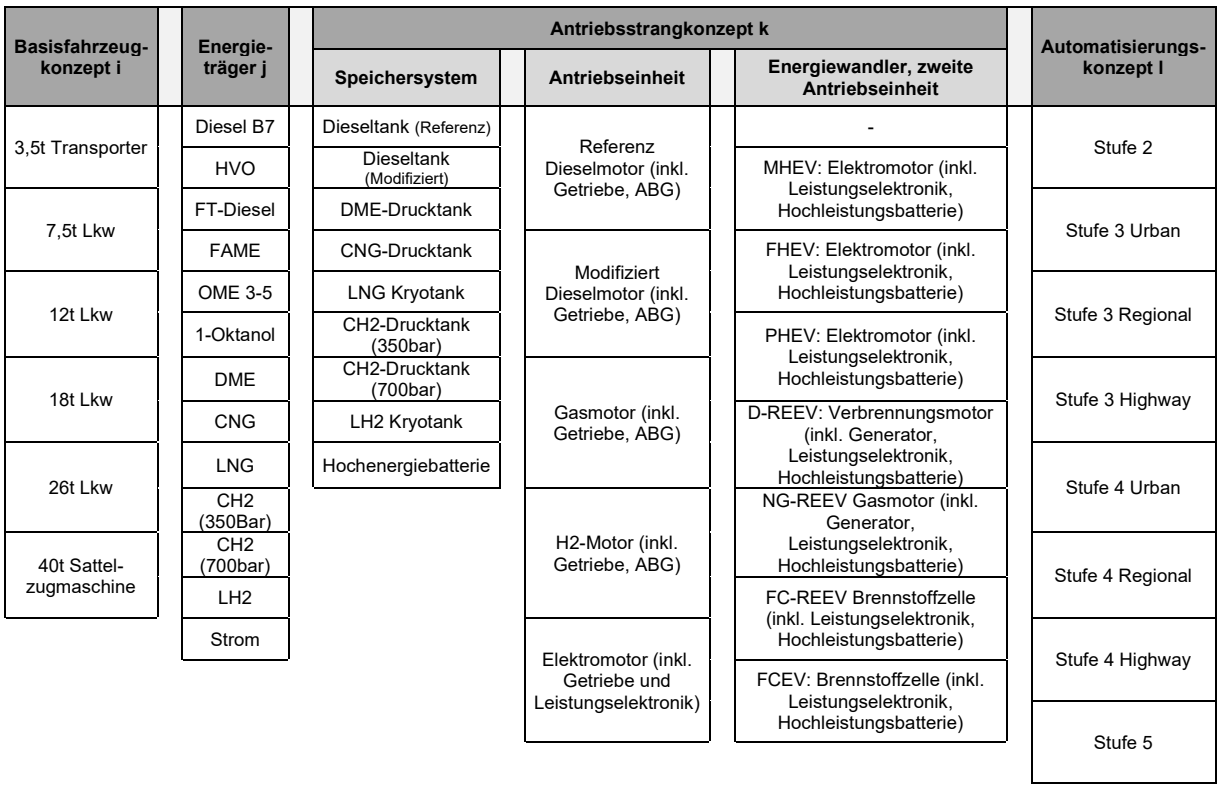


Abbildung 15: Betrachtete Antriebsstrang-, Energie- und Automatisierungskonfigurationen für verschiedene Nutzfahrzeugsegmente im Rahmen der Konzeptauslegung (eigene Darstellung)

4.2.1 Auslegung von Kraftstoff-Antriebskombinationen

Die in Kapitel 3.3 nach dem Stand der Technik parametrisiert verbrennungsmotorischen Antriebsstrangkomponenten sind hinsichtlich ihres Einsatzes mit dem Referenz-Dieselkraftstoffgemischs B7 geprüft. Um die Notwendigkeit neuer Motorkonzepte für den Einsatz alternativer Dieselkraftstoffarten zu evaluieren, ist eine Überprüfung der technischen Systemkompatibilität zwischen den Eigenschaften der alternativen Kraftstoffe und den Normierungsgrundlagen für die bestehenden Antriebskomponenten erforderlich. Die Beimischungsmenge zum Referenz-Dieselkraftstoffgemisch stellt in diesem Kontext den limitierenden Faktor dar.

In Tabelle 19 sind auf Basis der aktuellen Datenlage volumenspezifische Beimischungsgrenzen für die betrachteten biologischen und synthetischen Dieselkraftstoffsorten zusammengetragen. Die normative Beimischungsgrenze definiert auf Basis der geltenden Kraftstoffnorm EN 590 die zulässige Volumenmenge, die dem Referenzkraftstoff B7 ohne antriebsstrangtechnische Anpassung beigemischt werden darf. Die technische Beimischungsgrenze beschreibt die Volumenmenge, die

zwar keine Anpassungen am Antriebsstrang erfordert, aber bei der einzelne Kraftstoffkennwerte außerhalb der in der geltenden Kraftstoffnorm geforderten Grenzbereiche liegen können. Die gesammelten Beimischungsgrenzen basieren auf Angaben der OEMs. Darüber hinaus ist der Einsatz des betrachteten Kraftstoffs nur durch Modifikationen am Dieselantriebsstrang bzw. durch eine Neukonzeption des Antriebsstrangs möglich. Insbesondere sind materialtechnische Modifikationen am Tanksystem einschließlich der Kraftstoffleitungen, am Verbrennungsmotor ,insbesondere des Einspritzsystems, der Software sowie des Abgasnachbehandlungssystems erforderlich. Bei DME ist sogar ein Drucktanksystem und damit ein vollständiger Austausch der Komponenten notwendig.

Tabelle 19: Normative und technische Beimischungsgrenzen biologischer und synthetischer Dieselkraftstoffe

	Normative Beimischungs-grenze	**Technische Beimischungs-grenze**	**Erforderliche Umrüstung am Referenzantriebsstrang**		
			Tanksystem	Verbrennungs-motor	ABG-System
FAME	7%	20% (B20 Diesel)	Modifizieren	Modifizieren	Modifizieren
HVO	100%	-	-	-	-
FT-Diesel	100%	-	-	-	-
DME	0%	0%	Austauschen	Modifizieren	Modifizieren
OME 3-5	0%	15%	Modifizieren	Modifizieren	Modifizieren
1-Oktanol	0%	20%	Modifizieren	Modifizieren	-

Quelle: [90, 104, 112, 113, 214, 215]

4.2.2 Auslegung von Antriebsstrangkonzepten

Die notwendige Leistung des Fahrzeugantriebs ergibt sich aus den Anforderungen der Transportaufgabe und den Fahrbedingungen, da diese bestimmen, welche Fahrwiderstandskräfte in den jeweiligen Streckenabschnitt überwunden werden müssen. Die segmentspezifische Gesamtwiderstandskraft F_i entspricht der Summe der Luft-, Rad-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstände (siehe Formel 1) und wird über die in Tabelle 20 aufgeführten Formeln berechnet.

$$F_i = F_i^L + F_i^R + F_i^{St} + F_i^B \quad (1)$$

Tabelle 20: Formelsammlung – Längsdynamische Widerstandskräfte [137]

Luftwiderstand	$F_i^L = c_i^w \cdot A_i \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_L \cdot v^2$ mit: c_i^W : fahrzeugsegementspezifischer Luftwiderstandsbeiwert ρ_L : Luftdichte v : Fahrgeschwindigkeit A_i : fahrzeugsegmentspezifische Querschnittsfläche
Rad-/Rollwiderstand	$F_i^R = f_i^R \cdot m_i^s \cdot g \cdot \cos \alpha$ mit: f_i^R : fahrzeugsegementspezifischer Rollwiderstandsbeiwert m_i^s : simulierte Fahrzeugmasse inklusive Zuladung α: Fahrbein-Steigungswinkel g : 9,81 m/s²
Steigungswiderstand	$F_i^{St} = m_i^s \cdot g \cdot \sin \alpha$
Beschleunigungswiderstand	$F_i^B = e \cdot m_i^s \cdot a$ mit: e = Drehmassenfaktor a = Beschleunigung

Zur Bestimmung der am Antriebsstrang abzugebenden mechanischen Antriebsleistung für verschiedene Antriebskonzepte ist der antriebsstrangspezifische Wirkungsgrad zu berechnen. Der Wirkungsgrad des Antriebsstranges η_k ist das Produkt der Einzelwirkungsgrade der relevanten Antriebsstrangkomponenten. In Tabelle 21 sind die verwendeten Gleichungen zur Berechnung des Systemwirkungsgrades für verschiedene Antriebsstrangkonzepte aufgeführt.

Tabelle 21: Formelsammlung – Antriebsstrangspezifische Wirkungsgrade (in Anlehnung an [11])

ICE Wirkungsgrad	$\eta_{ICE} = \eta_{eff} \cdot \eta_G \cdot \eta_E = \frac{1}{b_e \cdot H_u} \cdot \eta_G \cdot \eta_E$ mit: b_e : spezifischer Kraftstoffverbrauch H_u : untere Heizwert η_g : Getriebewirkungsgrad (ICE) η_E : Wirkungsgrad des Achsdifferentials
MHEV/FHEV Wirkungsgrad	$\eta_{xHEV} = \eta_{ICE} \cdot \eta_{HF}$ mit: η_{HF} : Hybridisierungsfaktor (abhängig vom Fahrprofil)
BEV Wirkungsgrad	$\eta_{BEV} = \eta_{EM} \cdot \eta_{LE} \cdot \eta_{GE} \cdot \eta_E \cdot \eta_{BS} \cdot (1 + REK \cdot \eta_{REK})$ mit: η_{EM} : Wirkungsgrad der elektrischen Maschine η_{LE} : Wirkungsgrad der Leistungselektronik η_{GE} : Getriebewirkungsgrad (EV) η_{BS} : Wirkungsgrad des Batteriesystems η_{REK} : Wirkungsgrad der Bremsenergierückgewinnung REK : Anteil der Bremsenergierückgewinnung im Fahrprofil
PHEV Wirkungsgrad	$\eta_{PHEV} = (1 - EF) \cdot \eta_{ICE} + (EF \cdot \eta_{BEV})$ mit: EF: elektrischer Fahranteil in der Transportaufgabe
ICE-REEV Wirkungsgrad	$\eta_{REEV} = (EF \cdot \eta_{BEV}) + ((1 - EF) \cdot \eta_{eff} \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_{LE} \cdot \eta_{BEV})$ mit: η_{EM} : Wirkungsgrad der elektrischen Maschine, hier als elektrischer Generator
FCEV Wirkungsgrad	$\eta_{FCEV} = \eta_{BEV} \cdot \eta_{FC} \cdot \eta_{LE}$ mit: η_{FC} : Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems
FC-REEV Wirkungsgrad	$\eta_{REEV} = (EF \cdot \eta_{BEV}) + ((1 - EF) \cdot \eta_{FC} \cdot \eta_{LE} \cdot \eta_{BEV})$

Der systemische Wirkungsgrad eines **verbrennungsmotorischen Antriebskonzepts** (Internal Combustion Engine, ICE) ergibt sich aus dem effektiven Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors sowie den Wirkungsgraden des manuellen oder automatisierten Getriebes und des Achsdifferentials. Der effektive Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors ergibt sich näher aus dem spezifischen Kraftstoffverbrauch im jeweiligen Betriebspunkt und dem unteren Heizwert des Kraftstoffs. Zur Abschätzung des spezifischen Wirkungsgrads eines verbrennungsmotorischen Antriebskonzepts mit alternativen Kraftstoffen wird unter der vereinfachenden Annahme, dass der spezifische Kraftstoffverbrauch des Motor zu verschiedenen Lastpunkten identisch zum Referenz-Verbrennungsmotor ist, die spezifische Wirkungsgradberechnung über die Variation des Heizwerts der jeweiligen alternativen Kraftstoffart durchgeführt.

Beim **batterieelektrische Antriebskonzept** (Battery Electric Vehicle, BEV) setzt sich der systemische Wirkungsgrad aus den Einzelwirkungsgraden von Elektromotor, ein- bis vierstufigem automatisierten Getriebe, Leistungselektronik sowie Hochenergiebatterie zusammen. Um die effektive Energieeffizienz eines BEVs realistisch abzubilden, wird dieser systemische Wirkungsgrad um die Rückgewinnungseffekte durch Rekuperation ergänzt, die fahrprofilspezifisch variieren. Bei einem **brennstoffzellenelektrisches Antriebskonzept** (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) wird zusätzlich der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle berücksichtigt, welche den im Druck- oder Flüssigkeitstankt gespeicherten Wasserstoff in elektrische Energie umwandelt.

Je nach Hybridisierungsvariante kommen verbrennungsmotorischer und elektrischer Antriebsstrang in unterschiedlicher Leistung und Funktion zum Einsatz. Bei der **Mild-Hybridisierung** (Mild Hybrid Electric Vehicle, MHEV) wird ein kleiner elektrischen Antriebseinheit ergänzt, der zur Unterstützung des verbrennungsmotorischen Drehmoments dient. Ein **Vollhybridkonzept** (Full Hybrid Electric Vehicle, FHEV) integriert einen leistungsstärkeren elektrischen Antriebsstrang, um das Fahrzeug zeitweise elektrisch, mit der gewonnen elektrischen Energie durch Rekuperation, anzutreiben. Um die Effizienzsteigerung durch den elektrischen Antrieb für beide Konzepte zu definieren, sind in Abhängigkeit der Transportaufgabe Hybridisierungsfaktoren zugrunde gelegt.

Beim **Plug-in-Hybridfahrzeug** (Plug-in Electric Vehicle, PHEV) ist die installierte Hochleistungsbatterie extern über den on-board Charger aufladbar, wodurch eine weitere Fahrstrecke elektrisch bis zu einem kritischen Ladezustand der Batterie (SOC min) gefahren werden kann. Um die Lastanforderungen im Fahrprofil über den Elektromotor abzudecken, wird der durchschnittliche Antriebsleistung zur Dimensionierung zugrunde gelegt. Der elektrische Fahranteil definiert dabei den Anteil der elektrischen Wirkungsgradkette am Gesamtwirkungsgrad und bestimmt somit die potenzielle Effizienzsteigerung beim PHEV.

Bei einem elektrische Fahrzeug mit Reichweitenverlängerer sogenannte **Range-Extended Electric Vehicle** (REEV) wird zunächst die in der Hochenergiebatterie gespeicherte Energie zum Antrieb des Elektromotors genutzt, bis ein definierter minimaler Ladezustand (SOC min) erreicht ist (Charge depleting mode). Danach liefert der Verbrennungsmotor (klassischer REEV) oder die Brennstoffzelle (REEV-FC, Fuel Cell) über den Generator entsprechend Energie zur Verlängerung der Reichweite des elektrischen Fahrzeugs (Charge sustaining mode). [165] Der Fahranteil im entsprechenden Fahrmodus definiert dabei den Anteil der spezifischen Wirkungsgradkette am Gesamtwirkungsgrad und bestimmt somit die potenzielle Effizienzsteigerung beim REEV.

Im Rahmen einer umfassenden Marktauswertung zu hybriden und elektrischen Nutzfahrzeugen, welche bis zum Jahr 2022 als serien- oder seriennahes Modell verfügbar waren, wurden zudem segmentspezifische Bandbreiten für die Leistungsdaten abgeleitet. In Tabelle 22 sind beispielhaft für verschiedene Segmente von batterieelektrischen Nutzfahrzeugen die Systemantriebs- und Ladeleistung sowie die Batteriekapazität aufgeführt, die als Ausgangswerte für die Dimensionierung der Batteriekapazität in Kapitel 4.4 herangezogen werden.

Tabelle 22: Bandbreite der Kenndaten von batterie-elektrischen Nutzfahrzeugmodellen auf Basis einer Marktauswertung im Jahr 2022 (eigene Auswertung auf Basis von Herstellerangaben)

	3,5t Transporter	7,5t Lkw	12t Lkw	18t Lkw	26t Lkw	40t Szm
Elektrische Antriebsleistung [kW]	*44-100*	*47-350*	*81-350*	*130-600*	*160-600*	*210-600*
Elektrische AC Ladeleistung [kW]	*7-22*	*20-22*	*20-22*	*20-22*	*20-22*	*20-22*
Elektrische DC Ladeleistung [kW]	*22-100*	*22-105*	*22-125*	*22-350*	*44-350*	*160-375*
Batteriekapazität [kWh]	*15-79*	*29-150*	*20-150**	*106-870*	*185-870*	*202-870*

4.2.3 Auslegung von Automatisierungskonzepten

In Abhängigkeit der jeweils zu betrachtenden Automatisierungsstufe werden für die Auslegung von Automatisierungskonzepten unterschiedliche Vorgehensweisen herangezogen. Die Konzepte der Stufen 1 bis 3 basieren auf der Integration verschiedener Fahrerassistenzsysteme, deren Konfiguration anhand von Marktdaten erfolgt. Für die Stufen 4 und 5 existieren hingegen bisher keine Referenzarchitekturen, weshalb im Folgenden Konzeptbeispiele unter Berücksichtigung wesentlicher funktionaler und sicherheitsrelevanter Anforderungen gemäß der SAE-Norm J3019 abgeleitet werden.

Fahrerassistenzsysteme (FAS) übernehmen dynamische Fahraufgaben in spezifischen Betriebsbereichen, die geografischen, tageszeitlichen und/oder umweltbedingten Einschränkungen sowie dem Vorhandensein bestimmter Verkehrs- oder Fahrbahneigenschaften unterliegen können [216]. Die Hauptfunktionen von FAS sind Spurhalten, Spurwechsel, Abstandsregelung, (Not-)Bremsen und Parken (Rangieren). Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Funktionalität in warnende (passive) und eingreifende (aktive) Systeme [217]. Durch die geeignete Kombination einzelne FAS lassen sich übergreifende Fahrfunktionen wie Stauassistent, Stadtassistent und Platooning realisieren. In Abbildung 16 sind bisher bekannte Fahrerassistenzsysteme hinsichtlich ihrer Fahraufgabe und Eingriffstiefe dargestellt.

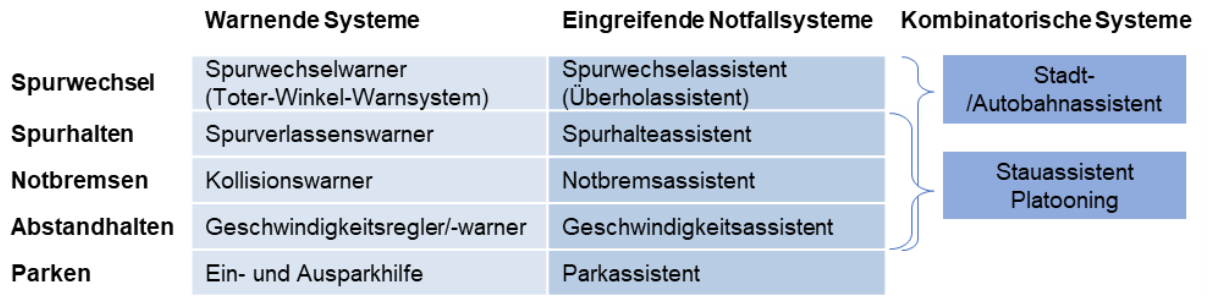


Abbildung 16: Wesentliche FAS nach Fahraufgaben und ihrer eingreifendtiefe (eigene Darstellung)

Das **Automatisierungsstufe 1** basiert auf der Integration von warnenden Fahrerassistenzsystemen, welche entweder die Längs- oder die Querführung unterstützen. Demgegenüber basiert das **Automatisierungsstufe 2** aus der Integration von mindestens zwei eingreifenden Fahrerassistenzsystemen, welche jeweils die Längs- und Querführung übernehmen. [216] Mit zunehmenden Automatisierungsgrad werden daher evolutionär passive durch zunächst im Notfall eingreifende und in der nächsten Ausbaustufe aktive Systeme ersetzt.

In Tabelle 23 sind die Komponentenausstattungen von passiven und aktiven FAS nach dem Stand der Technik dargestellt. Für das Stufe 2 Konzept sind demnach folgende Komponenten erforderlich: Ultraschallsensoren, Multifunktionskameras, Radarsensoren, Brake-by-wire-System, GPS-Empfänger, Mobilfunk-Kommunikationsmodul sowie entsprechende Steuergeräte für die einzelnen FAS.

Tabelle 23: Hardwareseitige Ausstattung aktueller Fahrerassistenzsysteme für leichte und schwere Nutzfahrzeuge

Fahrerassistenzsysteme	**Sensorik**				**GPS+ Karte**	**Kommuni-kation-modul**	**X-by-wire**	
	Ultraschall	Kamera	Radar	LiDAR			Brake	Steer
Spurverlassenwarner		Mono						
Aktive Spurhalteassistent		Mono	Fern				x	(x)
Spurwechselwarner (Toter-Winkel-Warner)			Fern					
Aktiver Spurwechselassistent		Stereo					x	x
Kollisionswarner		Mono	(x)					
Aktiver Notbrems-assistent		Mono	(x)				x	
Geschwindigkeitsregler/-warner		Mono						
Aktiver Geschwindigkeitsassistent		Mono	(x)	(x)	x		x	x
Ein- und Ausparkhilfe	x	Mono						
Aktiver Parkassistent	x	Mono	(x)				x	x
Stauassistent		Mono	Fern	(x)	x	x	x	x
Platooning		Mono	Fern		x	x	x	x
Stadtassistent		Stereo	Fern	(x)	x	x	x	x
Autobahnassistent		Stereo	Fern	(x)	x	x	x	x

x = notwendig, (x) = optional
Quelle: Hersteller und Zuliefererangaben sowie [38]

Gemäß der SAE Norm J3016 bezeichnet **Automatisierungsstufe 3** eine "bedingte Fahrautomatisierung", bei der die vollständige Übernahme der dynamischen Fahraufgabe durch das Automatisierungssystem innerhalb eines definierten Betriebsbereichs erfolgt [216]. Hierzu werden verschiedene aktive FAS, wie in einem Baukastensystem, zu fortschrittlichen Systemen kombiniert. Die Stop-and-Go-Funktion in Stausituationen im Stadtverkehr sowie das elektronische Deichseln, das sogenannte Platooning, auf Autobahnen bedingen aufbauend auf dem Stufe 2 Konzept darüber hinaus die Integration eines aktiven Spurhalteassistenten mit Steer-by-Wire-System. Für die Umsetzung des Autobahn-Platooning ist zusätzlich ein WLAN-Kommunikationsmodul erforderlich, welches eine Vernetzung der Fahrzeuge untereinander ermöglicht. Auf diese Weise können Informationen ausgetauscht werden, die nicht in Sichtweite der Sensoren liegen. In der nächsten Ausbaustufe innerhalb der Stufe 3, als Stadt- und Autobahnassistent, findet der aktive Spurwechselassistent Anwendung, welcher größere Lenkmomente autonom ausführt. In Abhängigkeit der Transportaufgaben der betrachteten Nutzfahrzeugkonzepte erfolgt im Rahmen der Arbeit eine Auslegung einsatzspezifischer Stufe 3 Konzeptvarianten.

Die SAE Norm J3016 legt für hoch automatisierte Konzepte fest, dass für den definierten Betriebsbereich die vollständige Objekt- und Ereigniserkennung und Reaktion (OEER) durch das System zu erfolgen hat [216]. Dies erfordert

entsprechende Sensorkonzepte, welche sich nicht nur auf einzelne Fahraufgaben, sondern auf den gesamten Betriebsbereich fokussieren.

In Bezug auf die Auslegung von Stufe 4 Konzepten erfolgt eine Differenzierung entsprechend den typischen Transportaufgaben der Nutzfahrzeuge in Konzepte für den Stadt-, Land- und Autobahnverkehr. Als geeignete Auslegungsdimension für die erforderliche Sensorauslegung wird der Geschwindigkeitsbereich herangezogen. So muss der Anhalteweg in Fahrtrichtung stets innerhalb der Sensorsichtweite liegen, da andernfalls bei plötzlichem Auftauchen von Objekten innerhalb der Sensorsichtweite ein rechtzeitiges Abbremsen zur Vermeidung einer Kollision nicht möglich ist. Der Anhalteweg setzt sich aus dem Reaktionsweg und dem Bremsweg zusammen und kann in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit v, der Reaktionszeit t und Bremsverzögerung a nach folgender Formel berechnet werden:

$$\text{Anhalteweg} = \text{Reaktionsweg} + \text{Bremsweg} = (v \cdot t_{\text{Reaktion}}) + \left(\frac{v^2}{2 \cdot a}\right) \qquad (2)$$

Unter Berücksichtigung der maximal Geschwindigkeiten für verschiedene Einsatzbereiche: Stadtverkehr, Regionalverkehr und Autobahnverkehr, und unterschiedlicher Bremsverzögerung für leichte und schwere Nutzfahrzeuge lassen auf Basis der spezifischen Anhaltewege die Anforderungen für den Mindestmessbereiche der entsprechenden Sensorkonzept ableiten. Auf Grundlage der in Kapitel 3.4.1 definierten Kenngrößen für die Reichweite und Öffnungswinkel der Sensoren lassen sich segmentspezifische Sensorkonzepte ableiten. Die 360-Grad-Erfassung des Verkehrsumfeldes wird hierbei durch die Kombination von Nahbereichsradar und Mono-Multifunktionskamera realisiert. Zusätzlich liefert die Stereo-Multifunktionskamera 3D-Informationen zur Objekterkennung und -klassifizierung. Für zuverlässige Abstandsmessungen im Langstreckenbereich wird das Fernbereichsradar eingesetzt. Zur Steigerung der Auflösung und zur Redundanz wird außerdem Nahbereichs-LiDAR ergänzt.

Ein weitere wesentliches Unterscheidungsmerkmal der **Automatisierungsstufe 4** "hohe Fahrautomatisierung" zur Stufe 3 ist, dass der menschliche Fahrer nicht mehr als Rückfallebene für die Objekt- und Ereigniserkennung vorgesehen ist. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die Ausfallsicherheit durch eine vollständig redundante Auslegung des Automatisierungssystems zu gewährleisten. Es werden hierbei zwischen drei Redundanzstrategien unterschieden: Fail-Safe, Fail-Passive und Fail-

Operational [218]. Während bei Fail-Safe- und Fail-Passive-Systemen der Mensch[34] weiterhin als Rückfallebene eingeplant ist, erfordert Fail-Operational, wie es für Stufen 4 und 5 erforderlich ist, eine vollständige hardwareseitige Redundanz aller sicherheitskritischen Komponenten. Im Bereich der Sensorik wird Redundanz häufig durch Überlappung der Messbereiche unterschiedlicher Sensortypen realisiert [188]. In den hier betrachteten Sensorkonzepten umfasst dies den Einsatz von Fernbereichs-LiDAR-Sensoren zur Detektion in größerer Entfernung, kombiniert mit Monokameras und Nahbereichs-LiDAR-Sensoren für eine ausfallsichere 360-Grad-Umfelderfassung. Die Aktorik wird durch ein zweites X-by-Wire-System redundant ausgelegt [203]. Zudem wird ein zusätzliches Notfall-Steuergerät implementiert, das über ein separates Bordnetz versorgt wird [219]. Die Vernetzungsfunktion wird redundant aufgebaut, typischerweise durch eine Kombination aus WLAN- und Mobilfunktechnologie.

Für die **Automatisierungsstufe 5** "Vollautomatisierung des Fahrens" gibt es keine Einschränkung des Betriebsbereichs, so dass das System in allen Betriebsbereichen funktionieren muss. Allerdings ist nach derzeitigem Erkenntnisstand kein neues Sensorkonzept im Vergleich zur Stufe 4 notwendig. Der wesentliche Unterschied stellt das fahrerhauslose Basisfahrzeugkonzept dar und damit entfällt die Mensch-Maschine Schnittstelle im Betrieb. In Tabelle 24 ist beispielhaft für den 26t Lkw die abgeleiteten Anzahl der Komponente je Automatisierungsstufe dargestellt.

[34] wobei im Fail-Passive-Fall häufig ein zweites Steuergerät (ECU) zur Systemüberwachung vorgesehen ist

Tabelle 24: Sensorkonzeptbeispiele für unterschiedliche Automatisierungsgrade beispielhaft für den 26t Lkw (eigene Darstellung)

	Stufe 2	**Stufe 3**	**Stufe 4/5**
Ultraschallsensoren	12	12	12
Nahbereichsradar	3	4	4
Fernbereichsradar	0	1	1
Mono-Kamera	1	3	5
Stereo-Kamera	1	1	2
Nahbereichs-LiDAR	0	1	2
Fernbereichs-LiDAR	0	0	1
Brake-By-Wire	1	1	2
Steer-By-Wire	0	1	2
GPS	1	1	1
Wlan	0	1	1
5G	1	1	1
Steuergerät	L2	L3	2x L4/5
HMI	1	1	0

Die Gesamtleistungsaufnahme der Automatisierungssysteme P_{auto} ergibt sich aus der Summe der elektrischen Leistungsaufnahmen aller Komponenten (siehe Formel 3). Dabei wird die Leistungsaufnahmen jeder Automatisierungskomponente c berechnet, in dem ihre mittlere elektrische Leistungsaufnahme p_{comp} (siehe Kapitel 3.4) mit der Anzahl der verbauten Einheiten n_l (siehe beispielhaft Tabelle 24) sowie dem durchschnittlichen Nutzungsgrad d_l multipliziert wird.

$$P_l = \sum (n_l \cdot p_{comp} \cdot d_l) \quad (3)$$

In Abbildung 17 ist somit exemplarisch für einen 26 t Lkw die Verteilung des zusätzlichen fahrzeuginternen Energiebedarfs der einzelnen Automatisierungskomponenten in Abhängigkeit von den Automatisierungsstufen dargestellt. Auf Basis des in Kapitel 4.3 beschriebenen fahrzyklusspezifischen Ansatzes ergeben sich somit für die betrachteten Automatisierungsstufen spezifische Zusatzenergiebedarfe von rund 140 Wh/100 km für Stufe 2, 350 Wh/100 km für Stufe 3, 868 Wh/100 km für Stufe 4 sowie 1.468 Wh/100 km für Stufe 5.

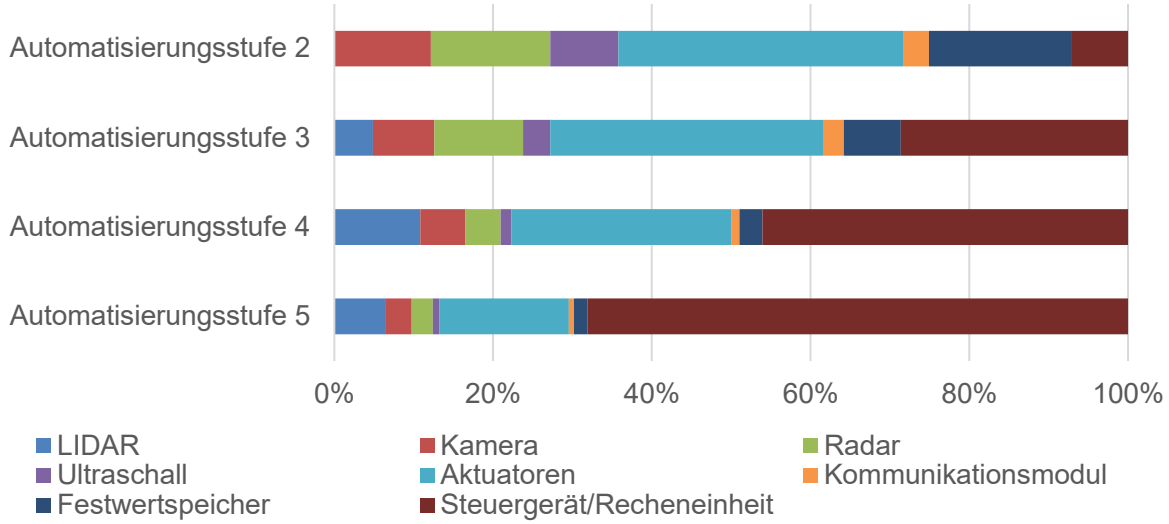


Abbildung 17: Verteilung des fahrzeuginternen Energiebedarfs der Automatisierungssysteme nach Komponenten und Automatisierungsstufe

4.3 Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs

Der spezifische, streckenbezogene Energieverbrauch $E_{i,k,l}$ (in MJ/km) für die betrachteten Fahrzeugkonzepte wird anhand der erforderliche Antriebsleistung zur Überwindung der Fahrwiderstandskräfte $\mathrm{F_i}$, der Wirkungsgrad des Antriebsstrangs n_k und das Fahrprofil bestimmt [137]. Der antriebsstrangspezifische Energieverbrauch wird damit wie folgt berechnet:

$$\mathrm{E_{i,k}} = \frac{\int \frac{1}{\mathrm{n_k}} \cdot \mathrm{F_i} \cdot \upsilon \cdot \mathrm{dt}}{\int \upsilon \cdot \mathrm{dt}} \tag{4}$$

Der Einfluss des Fahrverhaltens auf den Energieverbrauch wird durch standardisierte Fahrprofile definiert, die den zeitlichen Verlauf von Geschwindigkeit und Beschleunigung unter typischen Fahrbedingungen charakterisieren. Die Tank-to-Wheel (TtW) Phase beschreibt dabei den spezifischen Energie- und CO_2-Verbrauch eines Fahrzeugs während des Betriebs gemäß den Vorgaben eines standardisierten Fahrzyklus. Für die Typgenehmigung von leichten Nutzfahrzeugen in der EU ist der „Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure“ (WLTP) für die Verbrauchs- und Emissionsmessung gesetzlich vorgeschrieben [220]. Die Verbrauchswerte werden unter Testfahrten nach dem WLTP ermittelt.

Bei schweren Nutzfahrzeugen in der EU erfolgt die Messung nicht direkt am Fahrzeug, sondern durch das Simulationstool VECTO (Vehicle Energy Consumption Calculation

Tool) der EU-Kommission [221]. In VECTO[35] sind für typische Einsätze von schweren Nutzfahrzeugen standardisierte Fahrzyklen, sogenannte VECTO-Zyklen, hinterlegt. Abbildung 18 zeigt die Geschwindigkeitszeitverläufe der verschiedenen VECTO Standardzyklen, welche die Charakteristika eines Stadt-, Regional- und Autobahnzyklus widerspiegeln. Diese werden in dieser Arbeit zugrunde gelegt.

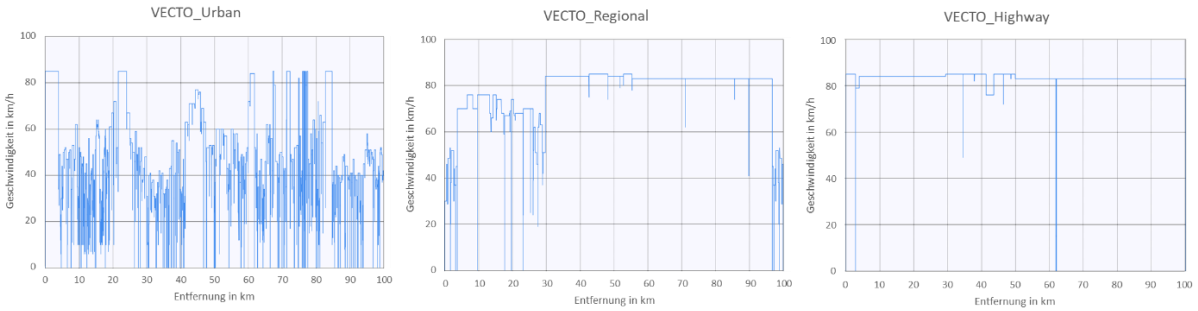


Abbildung 18: Betrachtete VECTO Geschwindigkeit-Zeit-Profile im Rahmen der Arbeit

Neben dem direkten Einfluss der Automatisierung durch den zusätzlichen Energieverbrauch der Automatisierungskomponenten beeinflusst auch die automatisierte Trajektorienplanung das Fahrverhalten. Dieser kann zu einem energieeffizienteren Fahrverlauf führen. In der Folge können sich, im Vergleich zu standardisierten Prüfzyklen, abweichende Geschwindigkeit-Zeit-Verläufe ergeben, was zur Änderung des effektiven Fahrprofils führt. Entsprechende Fahrzyklen, welche automatisierte Fahrzeugführung realitätsnah abbilden, stehen allerdings zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht zur Verfügung.

Um den Einfluss der automatisierten Fahrzeugführung dennoch auf den fahrzyklusspezifischen Energie- und Emissionsverbrauch zu berücksichtigen, werden für einzelne Automatisierungssysteme spezifische Effizienzpotentiale definiert. Solche Energieeinsparungen außerhalb standardisierter Testbedingungen werden als off-cycle Effizienzpotentiale bezeichnet. Sie beschreiben die Effekte der automatisierten Fahrzeugführung, die den Energieverbrauch unter realen Fahrbedingungen senken können, jedoch in standardisierten Testzyklen nicht berücksichtigt werden. Die Höhe des off-cycle Effizienzpotentiale hängt dabei stark vom spezifischen Einsatzbereich ab. Daher erfolgt in dieser Arbeit eine Differenzierung der Einsparungspotenziale sowohl nach Einsatzbereich als auch nach Automatisierungsgrad. Diese werden als einsatz- und

[35] Die direkte Nutzung des Simulationstools für die Verbrauchsrechnung der in dieser Arbeit betrachteten Fahrzeugkonfigurationen ist nicht möglich, da VECTO zum Zeitpunkt dieser Forschungsarbeit nicht den Einfluss der Fahrerassistenzsysteme bzw. der autonomen Fahrfunktion sowie nicht für alle betrachteten Antriebsoptionen entsprechende Modellfunktionen bereitstellt.

automatisierungsgradspezifische Effizienzpotentiale EE_l bezeichnet. Die Annahmen zu den EE_l sind in Tabelle 25 zusammengefasst. Zusätzlich wird der Energieverbrauch berücksichtigt, der durch die fahrgeschwindigkeitsunabhängige Leistung elektrischer Komponente für die Automatisierung P_l entsteht (wie im davorigen Unterkapitel erläutert). Auf Basis der Einsparungspotenziale wird der antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifische Energieverbrauch $\mathbf{E_{i,k,l}}$ für das betrachtete Fahrzeugkonzept durch folgende Formel berechnet:

$$E_{i,k,l} = \sum_x \left(E_{i,k} \cdot EE_l \cdot SA\right) + \int P_l \, dt \tag{5}$$

Die Streckenanteile SA in der betrachteten Transportaufgabe gewichten dabei den spezifischen Energieverbrauch $E_{i,k,l}$ im jeweiligen Fahrprofil, sodass sich der streckenbezogene Energieverbrauch über den Gesamteinsatz ergibt.

Tabelle 25: Energieeinsparungspotentiale der Automatisierung

		Kommunikations-technik	Stadtverkehr	Regionalverkehr	Fernverkehr
Ab Stufe 2	Fahrertraining	-	0 bis -10%	0 bis -10%	0 bis -10%
	Eco-Driving mit Adaptive Cruise Control (ACC) z.B. als Stadt- oder Autobahnassistent)	-	+6,5% bis -2,8%	0 bis -2%	-1 bis -2%
Ab Stufe 3	Eco -Driving mit Predictive Cruise Control (PCC) z.B. als Stadt- oder Autobahnassistent	GPS	-2 bis -5% (Annahme, wenig Studien)	-2 bis -9% (OEM: 5–6 %, teils bis -9 %)	-3 bis -8% (typ. 3–5 %, Einzelfälle bis 8 %)
	Eco-Driving mit Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC) z.B. als Platooning	V2V	-2 bis -10% (Konvois im ÖPNV, Annahme)	-4 bis -6% (Annahme, Überland-Konvois)	-5 bis -10% (Lead 4–5 %, Follow 9–10 %, Team ~7 %)
Stufe 4/5	Eco-Driving mit V2X Vernetzung	V2X	-5 bis -10% (Annahme)	-4 bis -6% (wie CACC)	-7 bis -10% (Annahme)

Quelle: [38][39] [40] **[41] [42] [222]**

4.4 Dimensionierung der Energiespeicherkapazität unter Berücksichtigung einsatzspezifischer und infrastruktureller Rahmenbedingungen

Da der Energiebedarf eines Fahrzeugs orts- und zeitgebunden gedeckt werden muss, kommt dem zeitlichen Profil der Transportaufgabe sowie der Verfügbarkeit von Lade- bzw. Betankungsmöglichkeiten bereits bei der Auslegung der Fahrzeugkonzepte eine zentrale Bedeutung zu. Insbesondere bei batterieelektrischen Antrieben ergibt sich daraus die Notwendigkeit, geeignete Ladestrategien zu entwickeln und in die Einsatzplanung zu integrieren. Die erforderliche Energiespeicherkapazität ergibt sich somit aus der benötigten Tagesreichweite unter Berücksichtigung der verfügbaren

Ladezeiten sowie der vorhandenen Ladeinfrastruktur. Darauf aufbauend wird der systemische Energiebedarf bestimmt, also jene Energiemenge, die unter den spezifischen betrieblichen und infrastrukturellen Rahmenbedingungen bereitgestellt werden muss. Die Auslegung ist dabei durch technische Begrenzungen eingeschränkt, insbesondere durch Einhaltung der Anforderungen an Nutzlast und Nutzvolumen aus dem jeweiligen Einsatzprofil sowie rechtliche Vorgaben, welche die maximal realisierbare Energiespeicherkapazität begrenzen. Innerhalb des so definierten Grenzen technischer Machbarkeit erfolgt eine stufenweise Annäherung an eine geeignete Energiespeicherkapazität in Kombination mit einer abgestimmten Ladestrategie. Die Auswahl der Ladestrategie erfolgt dabei unter Berücksichtigung einsatzspezifischer und infrastruktureller Rahmenbedingungen. In Abbildung 19 ist die Vorgehensweise zur Dimensionierung der Energiespeicherkapazität unter den definierten Rahmenbedingungen schematisch skizziert.



Abbildung 19: Vorgehensweise zur Dimensionierung der Energiespeicherkapazität unter Berücksichtigung einsatzspezifischer und infrastruktureller Rahmenbedingungen (eigene Darstellung)

Zunächst werden das zulässige Gesamtfahrzeuggewicht sowie der verfügbare Antriebsstrangbauraum untersucht.

Berechnung des Fahrzeugleergewichtes

Das maximal Fahrzeugleergewicht $\mathrm{mLG_i}$ für das betrachtete Fahrzeugsegment kann in erste Näherung[36] aus dem zulässigen Fahrzeuggesamtgewicht $\mathrm{zGG_i}$ und der

[36] zulässige Achslastanforderungen werden vernachlässigt

Nutzlastkapazität $\mathrm{NL_i}$ (siehe Tabelle 4) unter Berücksichtigung der einsatzspezifischen gravimetrischen Auslastung GA berechnet werden:

$$\mathrm{mLG_i} = \mathrm{zGG_i} - (\mathrm{NL_i} \cdot \mathrm{GA}) \tag{6}$$

Dabei wird gemäß der 55. Verordnung zur Änderung der straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften [223] ein höheres zulässiges Gesamtgewicht von zusätzlich bis zu zwei Tonnen bei der Auslegung der Elektrofahrzeugkonzepte berücksichtigt.

Das simulierte Fahrzeugleergewicht $\mathrm{LG_{i,k,l}}$ für das antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifische Nutzfahrzeugkonzepte ergibt sich aus der Addition der Massen des segmentspezifischen Basisfahrzeugkonzepts $\mathrm{m_i}$, des Energiespeicher-, des Antriebs- und des Automatisierungssystems. Die Gesamtmasse des Antriebssystems ist die Summe der relevanten Antriebskomponenten, die wiederum im Einzelnen über die gravimetrischen Leistungsdichte der Antriebskomponente $\mathrm{sm_{AT}}$ [in kg/kW] und der segmentspezifischer Antriebsleistung $\mathrm{AL_i}$ [in kW] dimensioniert werden. Für die Bestimmung der Masse des Energiespeichersystems sind entsprechend die gravimetrische Energiedichte der Komponenten $\mathrm{sm_{ES}}$ [in kg/kWh] und die segmentspezifische Energiekapazität $\mathrm{EK_i}$ in [kWh] relevant. Die spezifischen Energie- und Leitungsdichten (siehe Kapitel 3) sind zeit-dynamisch festgelegt und damit auch das simulierte Fahrzeugleergewicht. Damit lassen sich technologische Massenreduktionspotentiale der Komponente abbilden. Die Masse des Automatisierungssystems berechnet sich aus der Anzahl der verbrauten Einheiten $\mathrm{n_l}$ und deren Eigengewicht $\mathrm{m_{au}}$. Das Fahrzeugleergewicht wird schließlich wie folgt bestimmt:

$$\mathrm{LG_{i,k,l}} = \mathrm{m_i} + \sum_{1}^{\mathrm{ES}} (\mathrm{sm_{ES}} \cdot \mathrm{EK_i}) + \sum_{1}^{\mathrm{AT}} (\mathrm{sm_{AT}} \cdot \mathrm{AL_i}) + \sum_{1}^{\mathrm{AU}} (\mathrm{m_{AU}} \cdot \mathrm{n_l}) \tag{7}$$

Und Schließlich ist folgendes zu beachten:

$$\mathrm{LG_{i,k,l}} \leq \mathrm{mLG_i} \tag{8}$$

Berechnung des Antriebsstrangvolumens

Im Hinblick auf die volumetrische Betrachtung wird insbesondere die Integration des Antriebsstrangkomponente in die Fahrgestellstrukturen als Herausforderung angesehen. Daher liegt der Fokus auf der Ermittlung des Volumen des Antriebsstrangkonzeptes $\mathrm{v_k}$ und wird wie bei der Gewichtsuntersuchung wie folgt berechnet:

$$v_k = \sum_{1}^{ES} (sv_{ES} \cdot EK_i) + \sum_{1}^{AT} (sv_{AT} \cdot AL_i) \quad (9)$$

Das Volumen des Antriebsstrangkonzepts darf dabei den verfügbaren Bauraum für die Antriebsstrangintegration nicht überschreiten. Der verfügbare Bauraum entspricht der Summe aus dem dieselmotorischen Antriebsstranganteil ref_v_k und einem Freiheitsgrad, der sich aus dem nicht genutzten Nutzvolumen (mit Nutzraumkapazität NV_i (siehe Tabelle 4), einsatzspezifischen volumetrische Auslastung VA) berechnet. Und damit:

$$v_k \leq ref_v_k + [NV_i \cdot (1 - VA)] \quad (10)$$

Es ist anzumerken, dass unter Beachtung der gesetzlich beschränkten Fahrzeugabmessungen nach der StVZO §32 kaum Freiheitsgrade für eine mögliche Laderaumerweiterung mit derzeitigen Nutzfahrzeugkonzepte möglich sind.

Notwendige Bedingung für die Auslegung der Energiespeicherkapazität

Mobilitätsdaten in [11] sowie in [128] zeigen, dass in allen der betrachteten Nutzfahrzeugsegmente die volumetrische Auslastung des Ladungsträgers (z.B. Koffer oder Auflieger) stets höher liegt als die gravimetrische Auslastung. Andererseits deutet die Befragung in [66], dass die Akzeptanz für Nutzlastverluste im Transportgewerbe sehr gering ist. Weshalb die Einhaltung derzeitiger Nutzlast- also auch Laderaumkapazitäten als Grundanforderung für die Auslegung von Nutzfahrzeugkonzepte herangezogen wird.

Auf Basis der gestellten Bedingungen in der Gewichts- und Bauraumuntersuchung lassen sich somit die maximal zulässige gravimetrische $grav_EK_{i,k,l}$ und volumetrische $vol_EK_{i,k,l}$ Energiespeicherkapazitäten ermittelt. Die limitierende Größe zwischen beiden bestimmt dabei die maximal zulässige Energiespeicherkapazität $max_EK_{i,k,l}$ für das betrachtete Nutzfahrzeugkonzepte. Und es gilt:

$$\min\left(grav_EK_{i,k,l}, vol_EK_{i,k,l}\right) = max_EK_{i,k,l} \quad (11)$$

Eine hinreichende Bedingung für die Auslegung der Energiespeicherkapazität ergibt sich demgegenüber aus dem resultierenden systemischen Energiebedarf, der sich aus der geforderten Reichweite, der Verfügbarkeit geeigneter Ladeinfrastruktur, der gewählten Ladestrategie sowie der zeitlichen Integration der Ladephasen in den betrieblichen Ablauf zusammensetzt. Daher werden zunächst die Fahrzeugreichweite

und die Ladedauer für die betrachteten Nutzfahrzeugkonzepte berechnet sowie mögliche Ladestrategien vorgestellt.

Berechnung der Fahrzeugreichweite

Die Fahrzeugreichweite für die betrachtete Nutzfahrzeugkonzepte $\mathrm{FR_{i,k,l}}$ wird als Funktion der nutzbare Kapazität des Energiespeichers $\mathrm{EK_{i,k,l}}$ und des streckenbezogenen Energieverbrauchs $\mathrm{E_{i,k,l}}$ berechnet.

$$\mathrm{FR_{i,k,l}} = \frac{\mathrm{EK_{i,k,l}}}{\mathrm{E_{i,k,l}}} \tag{12}$$

Bei elektrischen Antriebsstrangkonzepte wird der nutzbare Anteil der Nennkapazität der Batterien für eine optimale Batterielebensdauer durch die empfohlene Entladetiefe DoD (Deepth-of-disharge) begrenzt [165]. Und damit:

$$\mathrm{EK_{i,k,l}} = \mathrm{EK_{i,k,l\,(nenn)}} * \mathrm{DoD_k} \tag{13}$$

Für die folgenden elektrische Antriebsstränge werden antriebsstrangspezifische DoD angenommen: PHEV und FCEV 0,80; für REEV und BEV 0,9 [224].

Berechnung der Ladedauer

Die Ladedauer der betrachteten elektrischen Nutzfahrzeugkonzeptes berechnet sich dabei aus der nutzbaren Kapazität des Energiespeichers und der Ladeleistung $\mathrm{LL_i}$ unter Berücksichtigung der Ladeverluste[37] LV.

$$\mathrm{LD_{i,k,l}} = \frac{\mathrm{EK_{i,k,l}}}{\mathrm{LL_i} * \mathrm{LV}} \tag{14}$$

Für die betrachteten flüssigen und gasförmigen Kraftstoffe werden die Befüllungsrate für sämtliche Konfigurationen als unkritisch angenommen. Diese liegen üblicherweise unter 15 min. pro Ladevorgang.

Die Integration der Ladezeiten in logistische Lenkzeitunterbrechungen ist stark von der individuellen Auftrags- und Tourenplanung abhängig und lässt sich nicht für alle Transportaufgaben generisch in diesem Untersuchungsrahmen ableiten. Hingegen

[37] Mit Ladeverlusten am Electric vehicle supple equipement von 98-99% [225].

lassen sich Ladezeiten in durch gesetzliche Lenkzeitunterbrechungen bedingte Fahrzeugstandzeit zuverlässiger einplanen, weshalb mit einer höher Nutzerakzeptanz zu erwarten ist [36, 66]. Generisch stehen damit zwei Zeitfenstern zur Verfügung: Kurze Standzeit zwischen zwei Lenkzeiten (min. 45 min) und lange Standzeit zwischen zwei Tagesfahrten (min. 9Std.). Zudem erfordert eine begrenzte Standzeit hohe Ladeleistungen, wobei gleichzeitig segmentabhängige Energiebedarfsniveaus zu berücksichtigen sind. Vor diesem Hintergrund werden segmentspezifische Ladeleistungen $\mathrm{LL_i}$ für Schon- und Schnellladevorgänge unterschieden, siehe Tabelle 26.

Tabelle 26: Angenommene fahrzeugsegmentspezifische Ladeleistungsklassen für Schon- und Schnellladung, mit Ladestandard für das entsprechende Ladesystem

Fahrzeug-segment	Schonladung-Leistungsklasse	Schnellladung-Leistungsklassen
N1	22 kW Wechselstrom-Ladesysteme (Typ 2)	150 kW Gleichstromladegerät (CCS)
N2	50 kW Gleichstromladegerät (CCS)	Bis 350 kW Gleichstromladegerät (CCS)
N3	100 kW Gleichstromladegerät (CCS)	Bis 1 MW Gleichstromladegerät (MCS)

Und es gilt:

$$\mathrm{Schonladung_LD_{i,k,l}} \leq \mathrm{Ruhezeit} \qquad (15)$$

$$\mathrm{Schnelladung_LD_{i,k,l}} \leq \mathrm{Pausenzeit}$$

Unterscheidung typischer Ladestrategien für elektrische Nutzfahrzeuge
In Anlehnung an [226] werden vier grundsätzliche Ladestrategien in Abhängigkeit von der verfügbaren Standzeit und der Zugänglichkeit der Ladestationen im privaten und öffentlichen Raum unterschieden:

Depot Schonladen: Schonladen über einen längeren Zeitraum (z. B. während der Ruhezeit) auf dem eigenen Betriebsgelände mittels einer mit dem Nutzfahrzeug anzuschaffenden Ladestation mit Ladeleistungen bis zu 50 kW.

Depot Schnelladen: Schnellladung über einen kürzeren Zeitraum (z. B. während der Lenkzeitpause) auf dem eigenen oder fremden Betriebsgelände (z. B. beim Kunden) mit Ladeleistungen bis zu 150 kW.

Öffentlich Schnellladen: Schnelladen über das öffentliche Ladenetz mit Ladeleistungen bis 350 kW für längere Standzeiten (z.B. Ruhezeit) wie an Umschlagpunkten in Gewerbegebieten. Die Verfügbarkeit der passenden Energieinfrastruktur im Einsatzgebiet der Nutzfahrzeuge ist dabei entscheidend.

Öffentlich Hochleistungsladen: Schnellladung über das öffentliche Ladenetz mit Ladeleistungen bis zu 1 MW für kürzere Standzeiten (z. B. während der Lenkzeitpause) wie an Autobahnraststätten. Die Verfügbarkeit der passenden Energieinfrastruktur im Einsatzgebiet der Nutzfahrzeuge ist hierbei auch entscheidend.

Hinreichende Bedingung für die Auslegung der Batteriegröße

Die Batteriegröße ist dann hinreichend geeignet, wenn die damit erreichbare Fahrzeugreichweite zusammen mit einer möglichen Reichweitenverlängerung durch Zwischenladen während verfügbarer Standzeiten ausreicht, um die geforderte Reichweite für den geplanten Fahrzeugeinsatz zu erfüllen. Und es gilt:

$$\mathrm{FR_{i,k,l}} + \mathrm{RZL_{i,k,l}} \geq \text{Reichweitenanforderung} \tag{16}$$

Wobei sich die Reichweitenerweiterung durch Zwischenladung $\mathbf{RZL_{i,k,l}}$ aus der geladenen Energiemenge während verfügbarer Standzeiten berechnet wird.

mit $$\mathrm{RZL_{i,k,l}} = \frac{\text{Standzeit} \cdot \mathrm{LL_i} \cdot \mathrm{LV}}{\mathrm{E_{i,k,l}}}$$

Die Anwendung der hinreichenden Bedingung zur Auslegung der Batteriegröße setzt die Verfügbarkeit geeigneter Ladeinfrastruktur während der geplanten Standzeiten voraus. Je nach infrastrukturellen Rahmenbedingungen wird daher zunächst geprüft, ob und in welchem Umfang eine Zwischenladung realisierbar ist (näheres zur Verfügbarkeit in Kapitel 6.2.1). In Abhängigkeit von der umsetzbaren Ladestrategie verändert sich somit die erforderliche Fahrzeugreichweite und damit die notwendige Energiespeicherkapazität. Steht keine geeignete Ladeinfrastruktur zur Verfügung, muss die Reichweitenanforderung vollständig durch die installierte Batteriekapazität abgedeckt werden, sofern dies innerhalb der technischen Begrenzungen für Masse und Bauraum realisierbar ist.

Besonderheit extern aufladbarer elektrischer Antriebskonzepte

Für Antriebskonzepte mit zwei Energiespeichern, wie Plug-in-Hybrid- (PHEV) oder Range-Extender-Elektrofahrzeuge (REEV), wird ergänzend der sogenannte Nutzungsfaktor UF (Utility Factor) eingeführt. Dieser beschreibt den Anteil der elektrisch zurückgelegten Fahrstrecke an der gesamten Tagesfahrleistung und liegt zwischen 0 und 1. Damit lässt sich die kombinierte Reichweite aus der rein elektrischen Fahrstrecke und der Reichweitenverlängerung durch den Verbrennungsmotor oder ein alternatives Energiesystem abbilden.

$$UF_{i,j,k,l} = \frac{FR_{i,k,l} + RZL_{i,k,l}}{TFL} \quad (17)$$

Der Nutzungsfaktor dient in der weiteren Modellierung sowohl zur Bestimmung des elektrischen Energieverbrauchs als auch zur Berechnung der CO_2-Emissionen von PHEV- und REEV-Konzepten, da er den Anteil der elektrischen Nutzung im realen Fahrbetrieb berücksichtigt.

Auslegung der Batteriegröße auf Basis der täglichen Streckenentfernung

Bezüglich des Tankverhaltens im gewerblichen Güterverkehr ist zu beobachten, dass aufgrund der höhere Flexibilität im Betrieb häufiger am Start- und Zielort einer Tour getankt wird [213]. Unter dieser Annahme, dass das Fahrzeug jeweils am Ende eines Tageszyklus bis zum Beginn des nächsten Zyklus vollständig geladen werden kann, wird zunächst die Reichweitenanforderung der betrachteten Transportaufgabe als Auslegungskriterium herangezogen. Dabei gilt: $RZL_{seg} = 0$ sowie $Schonladung - LD_{seg,ant,auto} \leq Ruhezeit$, d. h. es steht ausschließlich Ladeinfrastruktur am Depot oder an betrieblichen Standorten zur Verfügung. Die resultierende Energiespeicherkapazität darf dabei die maximal zulässige Größe gemäß: $EK_{i,k,l} \leq max_EK_{i,k,l}$ nicht überschreiten. Ist eine zusätzliche Zwischenladung entlang der Route möglich, reduziert sich der erforderliche Energieinhalt der Batterie um den durch Zwischenladung abgedeckten Bedarf. Damit kann die Batteriegröße verringert und das Fahrzeug leichter ausgelegt werden. Wird die maximal zulässige Bedingung für die Energiespeicherkapazität überschritten, erfolgt die Auslegung der Batteriegröße auf Basis der maximal möglichen Randbedingungen, d. h. es gilt: $EK_{i,k,l} = max_EK_{i,k,l}$. Um die Einsatzfähigkeit des Nutzfahrzeugs dennoch sicherzustellen, ist die Möglichkeit einer Reichweitenerweiterung durch Schnellladung während der Route zu berücksichtigen. Damit wird die Verfügbarkeit geeigneter Energieinfrastruktur entlang der Strecke zur Auslegungsbedingung. Aus der Berechnung resultiert eine technisch realisierbare Energiespeicherkapazität, die mit der daraus ableitbaren Fahrzeugreichweite in Verbindung mit der notwendigen Ladeinfrastruktur steht. Berücksichtigt wird dabei auch der eingesetzte Lademix aus gewählter Ladestrategie, wie z.B. 75% Depot-Schonladung und 25% öffentliche Schnellladung, und den entsprechenden Ladezeiten. Diese beeinflusst wiederum die Berechnung der gewichteten Energieverbrauchskosten, wie in Kapitel 5.2.1 definiert.

5 Ökonomische Bewertung von antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifischer Nutzfahrzeugkonzepte auf Basis erweiterter Fahrzeugnutzungskosten

Die Wirtschaftlichkeit von Nutzfahrzeugen wird auf Basis der durchschnittlichen Kosten pro funktionaler Leistungseinheit, in der Regel pro Kilometer (Euro/km) oder pro Jahr (Euro/Jahr) berechnet [22]. Dabei werden alle relevanten Kosten auf die über die gesamte Nutzungsdauer zurückgelegte Fahrstrecke umgelegt. Grundlage hierfür ist die Annahme einer gegebenen Transportaufgabe mit festgelegter Fahrleistung und Nutzungsdauer, sodass die zeitliche Auslastung aller betrachteten Fahrzeugkonzepte identisch bewertet werden. Damit sind die Konzepte funktional identisch, und Unterschiede in der Wirtschaftlichkeit ergeben sich ausschließlich aus der Kostenstruktur. Bei Fahrzeugen mit höherem Automatisierungsgrad kann jedoch ein zusätzliches technologisches Nutzungspotenzial entstehen, das sich aus der gesteigerten zeitlichen Verfügbarkeit der Nutzfahrzeuge ergibt (vergleiche auch Nutzeranforderungen in Kapitel 2.4). Da gesetzliche Lenk- und Ruhezeiten entfallen, können automatisierte Fahrzeuge theoretisch eine höhere tägliche Einsatzzeit erreichen. Allerdings sind weiterhin und mögliche technologie-bedingte Standzeiten zu berücksichtigen. Eine erhöhte Verfügbarkeit führt in diesem Fall nur dann zu einem wirtschaftlichen Vorteil, wenn sie tatsächlich in zusätzliche Transportaufgaben umgesetzt werden kann, etwa durch zusätzliche Umläufe oder durch den Ersatz weiterer Fahrzeuge innerhalb einer Flotte. Um diesen monetäre Effekt innerhalb der Wirtschaftlichkeitsberechnung abzubilden, wird ein Auslastungsfaktor A_l eingeführt, der das Verhältnis der nutzbaren täglichen Verfügbarkeit des betrachteten Fahrzeuges zur Referenzverfügbarkeit ausdrückt und es gilt:

$$\mathrm{A_l} = \max\left(1, \frac{\mathrm{A_{i,j,k,l}}}{\mathrm{A_{i,ref}}}\right) \tag{18}$$

mit der nutzbaren Betriebszeit des betrachteten Nutzfahrzeugkonzeptes $\mathrm{A_{i,j,k,l}}$ und der Referenzverfügbarkeit $\mathrm{A_{i,ref}}$ festgelegt. Damit bildet $\mathrm{A_l}$ das technologische Nutzungspotenzial, insbesondere bei automatisierten Fahrzeugen, als monetärer Wirkungsfaktor ab. Die Wirtschaftlichkeit des betrachteten Nutzfahrzeugkonzept $\mathrm{W_{i,j,k,l}}$ ergibt sich damit als:

$$\mathrm{W_{i,j,k,l}} = \frac{\mathrm{Kosten}}{\mathrm{Leistung}} = \frac{\mathrm{RCO_{i,j,k,l}}}{(\mathrm{JFL} \cdot \mathrm{d}) \cdot \mathrm{A_l}} \tag{19}$$

wobei JFL die jährliche Fahrleistung, d die Nutzungsdauer und $\mathrm{RCO}_{i,j,k,l}$ die relevanten Fahrzeugnutzungskosten des betrachteten Nutzfahrzeugkonzept über die Nutzungsdauer darstellen.

An dieser Stelle ist hinsichtlich der gewählten Begrifflichkeit folgendes hervorzuheben. Während der **Total Cost of Ownership (TCO)** sämtliche während des gesamten Haltedauer eines Nutzfahrzeugs anfallenden Kosten umfasst, inklusive aller direkten, indirekten, fixen, variablen, oft auch unternehmensindividuellen Overhead- und Gemeinkosten, konzentriert sich die im Rahmen dieser Arbeit genannte **Relevant Cost of Ownership (RCO)** ausschließlich auf die kostenrelevanten Bestandteile, die sich durch die Auswahl eines spezifischen Fahrzeugkonzepts tatsächlich verändern. Hierbei stehen die fixen und variablen Betriebskosten, die spezifischen für das betrachtete Fahrzeugkonzepte sich differenzieren lassen, im Vordergrund. RCO blendet damit fahrzeugunabhängige Kosten wie unternehmensspezifische Gemeinkosten aus, um alternative Nutzfahrzeugkonzepte vergleichbar zu machen.

Die **relevanten Fahrzeugnutzungskosten** (Relevant Cost of Ownership[38]) $\mathrm{RCO}_{i,j,k}$ der betrachtete Nutzfahrzeugkonzepte ist die Summe der Anschaffungskosten $\mathrm{AK}_{i,j,k,l}$, der kumulierten Betriebskosten $\mathrm{BK}_{i,j,k,l}$, die während der Nutzungsdauer für das Nutzfahrzeug entstehe, und des geschätzten Fahrzeugrestwertes $\mathrm{RW}_{i,j,k,l}$. Um die zeitliche Verteilung der Kosten zu berücksichtigen, wird die Kapitelendwert-Methode herangezogen. Hierfür werden die Anschaffungs- und Betriebskosten ($\mathrm{AK}_{i,j,k,l}$ und $\mathrm{BK}_{i,j,k,l}$) über die kalkulatorische Nutzungsdauer d mit dem erwarteten Zinssatz z aufgezinst und die generierten Steuervorteile $\mathrm{SE}_{i,j,k,l}$ und der Restwert des Nutzfahrzeugkonzeptes $\mathrm{RW}_{i,j,k,l}$ davon abgezogen.

$$\mathrm{RCO}_{i,j,k,l} = (1+z)^{d} \cdot \mathrm{AK}_{i,j,k,l} + \sum_{t=1}^{d}\left((1+z)^{d-t} \cdot \mathrm{BK}_{i,j,k,l}\right) - \mathrm{SE}_{i,j,k,l} - \mathrm{RW}_{i,j,k,l} \quad (20)$$

Die kalkulatorische Nutzungsdauer orientiert sich an der steuerlichen bzw. betriebsüblichen Abschreibungs- bzw. Amortisationsdauer. Nach der Abschreibungstabelle des Bundesfinanzministeriums für die Güterbeförderung im Straßenverkehr werden Anlagegüter Lkw bis einschließlich 7,5t zGG über 6 Jahre, Lkw und Szm ab 7,5t zGG über 5 Jahre, Szm-Anhänger über 6 Jahre, üblicherweise linear, abgeschrieben. Nach § 7c EstG ist eine Sonderabschreibung für Elektro-Nutzfahrzeuge mögliche, welche im Jahr der Anschaffung bereits 50% der Anschaffungskosten gelten machen können. Durch die früher zurückerstatteten

[38] Im Gegensatz zum gängigen Ausdruck TCO (Total Cost of Ownership) fokussiert sich die RCO nur auf die relevante, messbare Kostenbestandsteile, die eine monetäre Differenzierung zwischen den konkurrierenden Technologieoptionen wiedergeben

Liquiden mitteln in Form von Steuerrückzahlungen wird Kapital für weitere Investition wieder freigegeben. Diese Möglichkeit erlaubt die Berücksichtigung des tatsächlicheren Wertverluste, die schneller eintreten als die gesetzliche Abschreibung, die gerade für kleine Unternehmen mit geringem Kapitel attraktiv ist. Für die Berechnung der segmentspezifischen Steuerersparnisse $\mathrm{SE}_{\mathrm{i,j,k,l}}$ werden als Rahmenbedingungen eine Unternehmenssteuer von 32,5%, ein resultierender Zinsatz von 6,27%, bestehend aus Inflation von 2% und kalkulatorischem Unternehmenszins von 8,4% herangezogen.

Zur vollständigen Bestimmung der relevanten Fahrzeugnutzungskosten ist eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Kostenkomponenten erforderlich. In Kapitel 5.1 wird hierzu auf die Anschaffungskosten $\mathrm{AK}_{\mathrm{i,j,k,l}}$ eingegangen, während Kapitel 5.2 die während des Betriebs anfallenden fixen und variablen Kosten $\mathrm{BK}_{\mathrm{i,j,k,l}}$ behandelt, die sich aus Energieverbrauch, Fahrpersonalkosten und Instandhaltungskosten zusammensetzen. Kapitel 5.3 widmet sich den Versicherungskosten, die auf Basis möglicher Sicherheitspotenziale von Automatisierungskonzepte berücksichtigt werden können. Abschließend erfolgt in Kapitel 5.4 die Restwertabschätzung.

5.1 Berechnung der Anschaffungskosten

Die Anschaffungskosten für das betrachtete Nutzfahrzeugkonzept $\mathrm{AK}_{\mathrm{i,j,k,l}}$ setzen sich aus Fahrzeugreis $\mathrm{FP}_{\mathrm{i,j,k,l}}$, der Anschaffungskosten für die notwendigen Depot-Ladestation (Electric Vehicle Supply Equipment) $\mathrm{AK}_{\mathrm{EVSE}}$, welche die Installationskosten einschließt (siehe Tabelle 27), sowie möglicher Kaufanreize, jeweils für die Anschaffung des Fahrzeuges $\mathrm{KA}_{\mathrm{seg,ant}}$ und der Infrastruktur $\mathrm{KA}_{\mathrm{EVSE}}$.

$$\mathrm{AK}_{\mathrm{i,j,k,l}} = \mathrm{FP}_{\mathrm{i,j,k,l}} - \mathrm{KA}_{\mathrm{i,k}} + \mathrm{EVSE_AK}_{\mathrm{k}} - \mathrm{EVSE_KA}_{\mathrm{k}} \tag{21}$$

Tabelle 27: Anschaffung- und Installationskosten der Depot-Ladesäulen nach Leistungsfähigkeit

Ladestation nach Leistungsfähigkeit	$\mathbf{AK_{EVSE}}$ Mittlere Preis der Ladesäule einschließlich der Installationskosten in EURO_{2020}	$\mathbf{BK_{EVSE}}$ Mittlere Betriebskosten der Ladesäule in EURO_{2020}/Jahr
AC 22 kW (Typ2-Stecker)	4.250	1.552
DC 50 kW (CCS)	25.743	1.784
DC 150 kW (CCS)	66.833	1.784*
* Annahme, Quelle: In Anlehnung an [13, 189, 227]		

Berechnung des dynamischen Fahrzeugherstellungspreises

Der Fahrzeugpreis $\mathrm{FP}_{\mathrm{i,j,k,l}}(\mathrm{t})$ (in EURO_{2020}) für das Nutzfahrzeugkonzept im Betrachtungsjahr t setzt sich aus den direkten und indirekten[39] Herstellungskosten sowie der Gewinnmarge des Fahrzeugherstellers[40] zusammen [228]. Aufgrund der Schwierigkeit, die indirekten Kosten zu schätzen und auf die Anzahl der verkauften Fahrzeuge umzulegen, wird häufig der Skalierungsfaktor „Retail Price Equivalent" $\mathrm{RPE}_{\mathrm{k,l}}$ (Einzelhandelspreisäquivalent) verwendet, der das Verhältnis der direkten Fahrzeugherstellungskosten $\mathrm{FHK}_{\mathrm{i,j,k,l}}$ zum Fahrzeugpreis wiedergibt [229].

$$\mathrm{FP}_{\mathrm{i,j,k,l}}(\mathrm{t}) = \mathrm{FHK}_{\mathrm{i,j,k,l}}(\mathrm{t}) \cdot \mathrm{RPE}_{\mathrm{k,l}} \qquad (22)$$

Bei neuen Technologien ist davon auszugehen, dass die indirekten Kosten aufgrund des erhöhten Aufwands bei der Integration in bestehende Fahrzeugstrukturen in den Anfangsjahren verhältnismäßig höher sind als bei konventionellen Technologien. In [230] werden dementsprechend RPE-Aufschläge in Abhängigkeit von der Komplexität der Technologieintegration vorgeschlagen. In Kombination mit dem S-Kurven-Konzept, das Technologien in Abhängigkeit nach ihrer Entwicklungsreife kategorisiert [231], lassen sich technologiespezifische RPE-Faktoren ableiten. In Tabelle 28 sind für Basis-, Schrittmacher- und Schlüsseltechnologien spezifische RPE-Zuschläge entsprechend der Komplexität der Technologieintegration zugeordnet. Diese werden zeit-dynamisch angesetzt in der Berechnung, so dass mit zunehmender Durchdringung von Schrittmacher- und Schlüsseltechnologie von einer Annäherung der Integrationskosten an die Basistechnologien ausgegangen wird.

Tabelle 28: Technologiespezifische RPE Aufschläge [230]

Komplexität der Technologieintegration	Technologie-Typ	RPE
Durchschnittliche Integrationskosten	Basistechnologie	1,4
Erhöhte Integrationskosten	Schrittmachertechnologie	1,56
Umfangreiche Integrationskosten	Schlüsseltechnologie	1,7

Die Herstellungskosten $\mathrm{FHK}_{\mathrm{i,j,k,l}}(\mathrm{t})$ des Nutzfahrzeugkonzept werden bottom-up auf Ebene der der relevanten Fahrzeugkomponente im Betrachtungsjahr t ermittelt. In der Summe setzen sie sich aus den Herstellungskosten des segmentspezifischen Basisfahrzeugkonzepts $\mathrm{k_i}$ (siehe Kapitel 3.1), des Energiespeicher-, des Antriebs- und des Automatisierungssystems zusammen. Die Herstellungskosten des

[39] für Forschung und Entwicklung, Marketing und Vertriebs sowie Transport- und Logistikkosten

[40] Inkl. Gewinnmarge des Fahrzeughändler

Antriebsstrangs sind die Summe der Herstellungskosten der relevanten Antriebsstrangkomponenten, die wiederum einzeln über die spezifischen Kosten der Komponente $\mathrm{sk_k}$ und die segmentspezifische Antriebsleistung $\mathrm{AL_i}$ oder Energiekapazität $\mathrm{EK_i}$ dimensioniert werden. Die Kosten des Automatisierungssystems ergeben sich aus der Anzahl der relevanten Komponenten $\mathrm{n_l}$ und deren spezifischen Kosten $\mathrm{sk_{AU}}$. Die Fahrzeugherstellungskosten $\mathrm{FHK_{i,j,k,l}}$ werden somit wie folgt berechnet:

$$\mathrm{FHK_{i,k,l}} = \mathrm{k_i} + \sum_{1}^{\mathrm{ES}} (\mathrm{sk_{ES}} \cdot \mathrm{EK_i}) + \sum_{1}^{\mathrm{AT}} (\mathrm{sk_{AT}} \cdot \mathrm{AL_i}) + \sum_{1}^{\mathrm{AU}} (\mathrm{sk_{AU}} \cdot \mathrm{n_l}) \tag{23}$$

Typischerweise sind die Herstellungskosten für neuartige Technologie am Anfang der Produktlebenszyklus hoch, mit unterschiedlichem Degressionspotenzialen. Um die dynamische Kostenentwicklung für neue Technologie abzuschätzen, wird die betriebswirtschaftliche Lernkurventheorie herangezogen. Der Lernkurvenansatz geht hierbei davon aus, dass mit zunehmender Produktionserfahrung (Lerneffekte) die Technologiekosten mit steigender kumulierter Produktionsmenge sinken. Für jede Verdopplung der kumulativen Produktionsmenge die Einzelstückkosten sinken die Technologiekosten um einen bestimmten Degressionsfaktor, der als Lernrate bezeichnet wird [232]. Durch die Ausweitung der Produktion stellen sich somit im Laufe der Zeit **Skaleneffekte** ein. Mathematisch lassen sich die spezifischen Herstellkosten $\mathrm{sk_{comp}}$ für ausgewählte Schrittmacher- und Schlüsselkomponenten[41] im Betrachtungsjahr t als Funktion der spezifischen Herstellkosten des Vorjahres $\mathrm{K(x_{t-1})}$, der Veränderung der Produktionsmenge $\frac{\mathrm{x_t}}{\mathrm{x_{t-1}}}$ und der Lernrate b beschreiben.

$$\mathrm{sk_{comp}} = \left(\mathrm{sk_{comp}(x_{t-1})} \cdot \left(\frac{\mathrm{x_t}}{\mathrm{x_{t-1}}} \right)^{-\mathrm{b}} \right) \tag{24}$$

$$\mathrm{b} = \frac{\ln(\mathrm{r})}{\ln(2)}, \text{wenn gilt: } -1 < \mathrm{b} < 0$$

Für die in Kapitel 2.4 ermittelten realen (inflationsbereinigten) spezifischen Komponentenkosten ist eine Zuordnung zur deren Produktionsmenge und eine technologiespezifische Lernrate erforderlich. Für $\frac{\mathrm{x_t}}{\mathrm{x_{t-1}}} = 2$, d.h. für jede Verdoppelung der kumulierten Produktionskapazität, finden sich in der Literatur technologiespezifische Lernraten, die die relativen Stückkostenänderungen abbilden. In Tabelle 29 sind für ausgewählte Antriebs- und Automatisierungskomponenten die

[41] Das S-Kurven-Konzept beschreibt den idealtypischen Lebenszyklus einer Technologie. Entsprechend der Einteilung in die Phasen: Entstehung, Wachstum, Reife und Alter, lassen sich Schrittmacher, Schlüssel- und Basistechnologien kategorisieren.

Herstellungskosten in Abhängigkeit von die Produktionsmenge sowie die Lernrate zusammengefasst.

Tabelle 29: Relevante ökonomische Parameter der Schrittmacher- und Schlüsseltechnologien

Komponente	Produktionsmenge M1 für Nfz-Markt	Produktionsmenge M2 restliche Fahrzeugmärkte	Spez. Komponenten-kosten bei Produktionsmenge M1+M2	Lernrate
Batteriesystem (Hochenergie)	10.000	100.000	258 EUR_{2020}/kWh	90%
Batteriesystem (Hochleistung)	1.000	100.000	366 EUR_{2020}/kWh	95%
Brennstoffzellensystem	1-100	1-100	228 EUR_{2020}/kW_{el}	90%
CH2-Speichersystem (350 bar)	1-100	1-100	873 EUR_{2020}/kg_{H2}	90%
CH2-Speichersystem (700 bar)	1-100	1-100	1053 EUR_{2020}/kg_{H2}	90%
LH2-Speichersystem	1-100	0	1053 EUR_{2020}/kg_{LNG} (Annahme)	95%
LiDAR (Nahbereich)	1-100	1.000	1520 EUR_{2020}/Stück	80%
LiDAR (Fernbereich)	1-100	1.000	3.500 EUR_{2020}/Stück	80%
Steuergerät (Stufe 2/3)	1.000	10.000	900 EUR_{2020}/Stück	85%
Steuergerät (Stufe 4/5)	1-100	1-100	2.500 EUR_{2020}/Stück	80%
Quellen: [233] und [234] [38] und [235] [160, 236]				

Anzumerken ist zudem, dass technologische Lernraten häufig ein globales Phänomen darstellen, das unmittelbar mit dem weltweiten Produktionsvolumen der Komponente für verschiedene Anwendungsbereiche zusammenhängt [237]. Vereinfachend wird daher angenommen, dass sich die technologiespezifischen Lernraten auf das deutsche Automobilproduktionsvolumen beziehen und sich somit die Nachfragesteigerung in Deutschland proportional zur globalen Nachfragesteigerung entwickelt. Damit werden technologische Übertragungseffekte bzw. **Spillover-Effekte** aus den anderen Märkten auf Basis der Entwicklungen und Erfahrungen vor allem aus den Pkw- und anderen Fahrzeugmärkten direkt (innerhalb der Szenarioannahmen, siehe Kapitel 6 und 7) berücksichtigt.

5.2 Berechnung der fixen und variablen Betriebskosten

Die Betriebskosten für die betrachtete Nutzfahrzeugkonzept $\mathrm{BK_{i,j,k,l}}$ setzen sich aus fahrzeugseitigen und anteiligen infrastrukturseitigen Betriebskosten $\mathrm{EVSE_BK_k}$ zusammen.

$$\mathrm{BK_{i,j,k,l}} = \mathrm{veh_BK_{i,j,k,l}} + \mathrm{EVSE_BK_k} \quad (25)$$

Die fahrzeugseitigen Betriebskosten $\mathrm{veh_BK_{i,j,k,l}}$ lassen sich beschreiben durch die fixen, jahresspezifischen Betriebskosten und den variablen, fahrleistungsabhängigen Betriebskosten. Die fahrleistungsabhängigen Betriebskosten setzen sich aus Energieverbrauchskosten $\mathrm{EK_{i,j,k,l}}$ den Instandhaltungskosten $\mathrm{IHK_{i,j,k,l}}$ und den Mautkosten[42] $\mathrm{MK_{i,j,k,l}}$ zusammen. Die jährlichen Fixkosten setzen sich aus Fahrzeugsteuern $\mathrm{FS_{i,j,k,l}}$, Fahrpersonalkosten $\mathrm{PK_{i,j,k,l}}$ und Versicherungskosten $\mathrm{VK_{i,j,k,l}}$ zusammen. Als neue Betriebskostenkomponente wird die nach § 8 Absatz 1 der 38. BimSchV geltende THG-Prämie $\mathrm{TP_{i,j,k,l}}$ berücksichtigt, gültig für BEV und FCEV, der sich aus dem jahresspezifischen Marktpreis für CO_2-Zertifikate und einer pauschal festgelegten CO_2-Einsparung je Fahrzeugsegment errechnet.

$$\mathrm{veh_BK_{i,j,k,l}} = \left(\left(\left(\mathrm{EK_{i,j,k,l}} + \mathrm{IHK_{i,j,k,l}} + \mathrm{MK_{i,j,k,l}} - \mathrm{TP_{i,j,k,l}}\right) \cdot \mathrm{JFL}\right) + \mathrm{FS_{i,j,k,l}} + \mathrm{PK_{i,j,k,l}} + \mathrm{VK_{i,j,k,l}}\right) * \mathrm{d} \quad (26)$$

5.2.1 Energieverbrauchskosten

Die jährlichen Energieverbrauchskosten $\mathrm{EK_{i,j,k,l}}$ ergeben sich als Produkt aus dem spezifischen Energieverbrauch der betrachteten Nutzfahrzeugkonzept $\mathrm{E_{i,k,l}}$, dem Energiepreis $\mathrm{EP_j}$ und der nutzerspezifischen Jahresfahrleistung JFL.

$$\mathrm{EK_{i,j,k,l}} = \mathrm{E_{i,k,l}} \cdot \mathrm{EP_j} \cdot \mathrm{JFL} \quad (27)$$

Dieser Zusammenhang gilt sowohl für flüssige und gasförmige Kraftstoffe als auch für Ladestrom.

Berücksichtigung der Kraftstoffzusammensetzung in den Kosten

Die Kraftstoffkosten werden in Abhängigkeit von der jeweiligen Kraftstoffzusammensetzung berücksichtigt. Dabei wird zwischen den Kosten für fossilen $\mathrm{EP_{fossil}}$ und CO_2-armen bzw. CO_2-freien Kraftstoffanteilen $\mathrm{EP_{grün}}$ unterschieden. Die über den Modellansatz definierten Beimischungsraten BR bestimmen den Anteil fossiler und alternativer Kostenkomponenten innerhalb des betrachteten Kraftstoffmixes und gehen entsprechend in die Berechnung des gewichteten Kraftstoffpreises ein. Damit werden die Kraftstoffkosten wie folgt definiert:

$$\mathrm{EP_{kraftstoffmix}} = \mathrm{EP_{fossil}} \cdot (1 - \mathrm{BR}) + \mathrm{EP_{grün}} \cdot \mathrm{BR} \quad (28)$$

[42] Die Maut wird nach [238] anhand der Summer einzelner feste Mautsätze [Euro/km] für Lärm, Luft, Infrastruktur und CO_2 bestimmt und sind als fahrzeugsegment-, einsatz- und jahresspezifischen Parameter in der Berechnung quantifiziert.

Gewichtung der Ladestromkosten

Die Ladestromkosten werden in Abhängigkeit des Lademixes gewichtet. Hierbei fließt der Anteil des Strombezugs über öffentliche bzw. private Ladepunkte in Form der Ladeanteile mit DC für Depot-Charging und 1−DC für öffentliches Laden ein. Dadurch ergibt sich ein gewichteter mittlerer Ladestrompreis $\mathrm{EP_{Ladestrommix}}$, der die unterschiedlichen Bezugsquellen des elektrischen Energieverbrauchs abbildet.

$$\mathrm{EP_{Ladestrommix}} = \mathrm{EP_{Depot}} \cdot \mathrm{DC} + \mathrm{EP_{Pulic}} \cdot (1 - \mathrm{DC}) \tag{29}$$

Für PHEV und REEV wird in Abhängigkeit des Utility Factors $\mathrm{UF_{i,j,k,l}}$ nach Kapitel 4.4 der elektrische Fahranteil und damit die anteiligen Stromverbrauchskosten zu den Kraftstoffverbrauchskosten gewichtet.

Zur Ermittlung der Energieträgerpreise werden im Modell die spezifischen Zusammensetzungen und Preisbestandteile berücksichtigt, die sowohl für Kraftstoffe als auch für elektrische Energie gleichermaßen relevant sind. Der Preis eines Energieträgers $\mathrm{EP_j^x}$ setzt sich dabei aus dem Produktpreis $\mathrm{EPP_j}$, der Energiesteuer $\mathrm{ES_j}$, den CO_2-Preis $\mathrm{CP_j}$ und sonstigen regulatorischen Abgaben $\mathrm{SRA_j}$ zusammen. Der Produktpreis des Energieträgers ist die Summe aus den variablen Produktbeschaffungskosten (Herstellungs-, Umwandlungs- und Transportkosten) und dem fixen Deckungsbeitrag (Verteilungs- und Bereitstellungskosten innerhalb Deutschlands sowie Marge). Dabei werden die Produktpreise für spezifische Endprodukte, wie z.B. 350bar CH2 und 700bar CH2 oder Ladestrom in Abhängigkeit von der Ladeleistung berücksichtigt. Der Berechnungsansatz erlaubt somit eine ökonomische Differenzierung einerseits nach der Energiequelle (fossile und erneuerbare) und anderseits nach der Endenergieform.

$$\mathrm{EP_j^x} = \mathrm{EPP_i} + \mathrm{ES_i} + \mathrm{CP_i} + \mathrm{SRA_i} \tag{30}$$

Die Energiesteuer wird nach dem deutschen Energiesteuergesetz erhoben und bemisst sich nach der Menge (Gewicht oder Volumen) des verbrauchten Kraftstoffs [239]. Für Erdgas (CNG, LNG) gilt derzeit bis Anfang 2027 eine Steuerermäßigung. Eine explizite Unterscheidung nach der Energiequelle findet nicht statt, weshalb biologische und synthetische Kraftstoffe gleichermaßen besteuert werden. Wasserstoff unterliegt derzeit keiner Energiesteuer. [240] Strom wird über das Stromsteuergesetz besteuert [241]. Zusätzlich fallen für Strom Netzentgelte sowie weitere Abgaben und Umlagen an, die pauschal als sonstige regulatorische Abgaben $\mathrm{SRA_j}$ definiert werden. Für die Berechnung der zukünftigen Steuersätze im Modell werden die Mindeststeuersätze für Kraftstoffe und Strom nach der EU-Energiesteuerrichtlinie berücksichtigt, die sich am Energiegehalt (Euro pro GJ) des Energieträgers orientiert. [242]

Ab 2021 wird in Deutschland der CO2-Preis auf fossile Kraftstoffe erhoben, der zunächst bis 2025 jährlich ansteigt [243]. Der spezifische CO2-Preis für fossile Kraftstoffe wird in Abhängigkeit der heizwertbezogenen Emissionsfaktoren der Energieträger berechnet. Biogene und synthetische Kraftstoffe, die CO2-neutral hergestellt werden, sind von der CO2-Bepreisung ausgenommen.

5.2.2 Fahrerpersonalkosten

Die jährlichen Fahrpersonalkosten $PK_{i,j,k,l}$ für den Betrieb des betrachteten Nutzfahrzeugkonzeptes setzen sich aus den Lohnkosten (Stundenlohn) und den Lohnnebenkosten (Sozialversicherungsbeiträgen und Unfallversicherung) des Berufskraftfahrers sowie dessen Arbeitszeiten zusammen. Die Lohnkosten werden in Abhängigkeit des Fahrzeugsegments, da diese die erforderliche Führerscheinklasse definieren, und des Einsatzbereiches definiert und basierend auf Auswertungen von Angaben aus den Internetportalen: lkw-fahrer-gesucht.com und Gehalt.de.

Bestimmung der Rolle des Berufskraftfahrers in automatisierungsgradspezifischen Fahrzeugkonzepten

Im Rahmen der Auslegung automatisierungsgradspezifischer Fahrzeugkonzepte wird geprüft, ob für die Durchführung der betrachteten Transportaufgabe der Einsatz eines Berufskraftfahrers erforderlich ist und damit die Fahrerpersonalkosten innerhalb der Betriebskostenrechnung einbezogen werden. Dabei erfolgt die Auslegung eines Gesamtkonzepts aus Fahrzeugkonzept, Fahrer und Energieinfrastruktur auf Grundlage transportaufgabenspezifischer Merkmale: Streckenanteil, Anzahl der täglichen Einzelfahrten und Bereitschaftszeit.

Ein zentrales Kriterium stellt die vollständige Abdeckung der Transportaufgabe durch das automatisierte System dar. Sind alle Streckenanteile innerhalb der definierten Operational Design Domain (ODD) ausführbar, gilt das Konzept hinsichtlich der Fahrzeugführung als vollständig automatisierbar. Ist dies nicht gegeben, bleibt der Einsatz eines Berufskraftfahrers notwendig. So ist bei Automatisierungsstufe 3 gemäß SAE J3016 grundsätzlich noch eine fahrerseitige Rückfallebene vorgesehen; diese Voraussetzung entfällt bei Automatisierungsstufe 4 und 5 unter der Bedingung, dass die vollständige Transportaufgabe innerhalb der Operational Design Domain abgebildet werden kann.

Ergänzend wird geprüft, ob im Rahmen der ausgelegten Ladestrategie in Kapitel 4.4 ein Zwischenladen für das betrachtete Fahrzeugkonzept erforderlich ist. Sofern die Transportaufgabe eine Zwischenladung während der Fahrt erfordert, ergibt sich daraus die Notwendigkeit einer personellen Verfügbarkeit zur Durchführung oder Überwachung des Ladevorgangs.

Darüber hinaus wird bewertet, ob während der Fahrt oder an Umschlagpunkten logistische Tätigkeiten anfallen, etwa Be- oder Entladevorgänge oder Dokumentationsaufgaben. Sind während der Fahrt regelmäßig logistische oder überwachende Aufgaben erforderlich und damit Bereitschaftszeiten notwendig (z. B. bei Abschnittsfahrten), wird weiterhin der Einsatz eines Berufskraftfahrers vorgesehen. Alternativ könnte in diesen Fällen ein sogenannter Transportmanager eingesetzt werden, der nicht zwingend über eine fahrerische Qualifikation verfügen muss und damit mit geringeren Lohnkosten verbunden wäre. Soll jedoch auch der Transportmanager vollständig entfallen, müssten zusätzlich sämtliche Schnittstellen der Transportaufgabe, etwa Be- und Entladeprozesse sowie Energieversorgungsvorgänge, automatisiert sein. Eine tiefere Betrachtung dieser logistischen Teilprozesse erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter. Erfordert die jeweilige Transportaufgabe hingegen keine Bereitschaftszeit des Berufskraftfahrers, etwa bei durchgehenden Einzelfahrten, sowie keine Zwischenladung, wird ein vollständiger Verzicht auf Fahrpersonal angenommen.

5.2.3 Instandhaltungskosten

Die Instandhaltung bezeichnet die Erhaltung und Wiederherstellung der Betriebsbereitschaft des Fahrzeugs und setzt sich aus Wartung, Inspektion und Instandsetzung zusammen [17]. Entsprechend setzen sich die jährlichen Instandhaltungskosten $\mathrm{IHK_{i,j,k,l}}$ für die betrachtete Nutzfahrzeugkonzept aus den jährlichen Kosten für die Wartung $\mathrm{WK_{i,j,k,l}}$ Inspektion $\mathrm{IK_{i,j,k,l}}$ und Instandsetzung $\mathrm{ISK_{i,j,k,l}}$ zusammen.

$$\mathrm{IHK_{i,j,k,l}} = \mathrm{WK_{i,j,k,l}} + \mathrm{IK_{i,j,k,l}} + \mathrm{ISK_{i,j,k,l}} \tag{31}$$

Die jährlichen Wartungskosten setzen sich aus der Summe der spezifischen Wartungskosten der verbauten Komponenten $\mathrm{wk_{komp}}$ des jeweiligen Antriebsstrang- und Automatisierungskonzeptes und der Jahresfahrleistung JFL zusammen.

$$\mathrm{WK_{i,j,k,l}} = \sum \mathrm{wk_{komp}} \cdot \mathrm{JFL} \tag{32}$$

In [244] sind die spezifischen Wartungskosten für Antriebsstrangkomponenten durch Summierung der anfallenden Material- und Arbeitskosten unter Berücksichtigung der Serviceintervalle der Komponente innerhalb der Jahresfahrleistung berechnet worden. Nach dem gleichen Ansatz wurden die spezifischen Wartungskosten für Automatisierungskomponenten ergänzt, wobei die Materialkosten hier im Fokus stehen.

Die jährlichen Instandhaltungskosten setzen sich aus der Summe der spezifischen Instandhaltungskosten der verbauten Komponenten des jeweiligen Antriebsstrang- und Automatisierungskonzeptes und der Jahresfahrleistung zusammen. In [17] ist definiert, dass die mittlere Ausfallwahrscheinlichkeit einer Komponente mit der erwarteten Lebensdauer einer Komponente gleichgesetzt werden kann. Dementsprechend werden in [244] die spezifischen Instandhaltungskosten für Antriebsstrangkomponenten durch Aufsummierung der anfallenden Material- und Arbeitskosten unter Berücksichtigung der Lebensdauer der Komponente berechnet. Nach dem gleichen Ansatz wurden die spezifischen Instandhaltungskosten für Automatisierungskomponenten ergänzt.

Die periodische Inspektionskosten $\mathrm{IK}_{\mathrm{i,j,k,l}}$ umfassen bei Nutzfahrzeugen gemäß § 29 StVZO die Kosten für die Hauptuntersuchung, die Abgasuntersuchung und die Sicherheitsprüfung. Bei Drucktankanwendungen kommen Kosten für die Dichtheitsprüfung und die Hochdruckprüfung hinzu. Die Kosten werden unter Berücksichtigung der Prüfintervalle innerhalb der Jahresfahrleistung aufsummiert.

5.3 Ableitung der Versicherungskosten auf Basis des Sicherheitspotentials

Die Versicherungskosten für Nutzfahrzeuge setzen sich aus mehreren Versicherungseinzelbeiträgen zusammen, die zusammen das Gesamtrisiko des Nutzfahrzeugbetriebs abdecken sollen. Die Kfz-Haftpflichtversicherung, die durch das Fahrzeug verursachte Personen- und Sachschäden gegenüber Dritten abdeckt, und die Frachtführerhaftpflichtversicherung, die den Frachtführer gegen Haftungsansprüche Dritter im Zusammenhang mit dem Transport von Gütern versichert, sind für Nutzfahrzeuge in Deutschland verpflichtend. Darüber hinaus deckt die Kaskoversicherung selbstverschuldete oder durch Vandalismus, Diebstahl oder Naturgewalten verursachte Schäden am Fahrzeug ab. [245] Weitere Versicherungskomponente: Insassenunfall-, Schutzbrief-, Gütertransport- und Werkverkehrsversicherung werden für eine nach Fahrzeugkonfiguration differenzierte Kostenberechnung als nicht wesentlich erachtet und daher im Rahmen dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Die relevanten jährlichen Versicherungskosten für die betrachtete Nutzfahrzeugkonzept $\mathrm{VK}_{\mathrm{i,j,k,l}}$ setzen sich somit aus den jährlichen Versicherungsbeiträgen für die Kfz-Haftpflichtversicherung $\mathrm{KfzHPV}_{\mathrm{i,j,k,l}}$, die Kaskoversicherung $\mathrm{KV}_{\mathrm{i,j,k,l}}$ und die Frachtführerhaftpflichtversicherung $\mathrm{FfHPV}_{\mathrm{i,j,k,l}}$ zusammen.

$$\mathrm{VK}_{\mathrm{i,j,k,l}} = \mathrm{KfzHPV}_{\mathrm{i,j,k,l}} + \mathrm{KV}_{\mathrm{i,j,k,l}} + \mathrm{FfHPV}_{\mathrm{i,j,k,l}} \tag{33}$$

Bei der Berechnung der Versicherungsprämien steht die Bewertung des Versicherungsrisikos anhand verschiedener Faktoren im Fokus [245]. Dabei werden fahrzeug-, fahrer- oder einsatzspezifische Tarifmerkmale herangezogen, die von den Versicherungsgesellschaften als relevante Risikofaktoren für das Eintritt potenzieller Schäden am Versicherungsgegenstand angesehen werden. Zur Ableitung segmentspezifischer Grundprämie für die Kfz-Haftpflicht- und Kaskoversicherung wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt, die in [246] ausführlich beschrieben ist. Dabei wurde für Nutzfahrzeugmodelle in Standardausführung je betrachtetem Segment (siehe Tabelle 4) der Zusammenhang zwischen verschiedenen Tarifmerkmalen und der Beitragshöhe anhand 16 Versicherungsverträgen untersucht. Die Auswertung ergab, dass die Beitragshöhe bei Nutzfahrzeugen im Wesentlichen durch die Tarifmerkmale Antriebsleistung oder Nutzlast beeinflusst wird. Im Gegensatz zur Pkw-Versicherung wird diese also weniger von der Fahrleistung beeinflusst. Diese Erkenntnis wurde durch Experteninterviews in [246] bestätigt. Als Dimensionierungsgröße wurde schließlich die Antriebsleistung gewählt. Die Regressionsgleichung für die segmentspezifischen Grundbeiträge der $\mathrm{Kfz-HPV}_{\mathrm{i,}}^{\mathrm{Basis}}$ und der $\mathrm{KV}_{\mathrm{i,}}^{\mathrm{Basis}}$ mit den abgleitenden Parameter sind wie folgt definiert:

$$\mathrm{KfzHPV}_{\mathrm{i,}}^{\mathrm{Basis}} = \mathrm{KfzHPV}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{a}} + \mathrm{KfzHPV}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{b}} \cdot \mathrm{AL}_{\mathrm{i}} \quad (34)$$

Tabelle 30: Parameter zur Berechnung des Grundbeitrags für die Haftpflicht- und Kaskoversicherung (eigene Auswertung)

	Haftpflichtversicherung		**Kaskoversicherung**	
	$\mathrm{KfzHPV}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{a}}$ [Euro_{2020}]	$\mathrm{KfzHPV}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{b}}$ [Euro_{2020}/Leistung]	$\mathrm{KV}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{a}}$ [Euro_{2020}]	$\mathrm{KV}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{b}}$ [Euro_{2020}/Leistung]
Transporter	1589	8,09	423	11,3
Lkw	2857	5,05	463	4,48
Szm	4768 (Fahrzeug) 282 (Anhänger)	0,45	1708 (Fahrzeug) 559 (Anhänger)	0,62

Zur Berücksichtigung von Zusatzkonfigurationen bei der Risikoprämienberechnung eignet sich der Typklassenfaktor. Der Typklassenfaktor berücksichtigt die Schadenhäufigkeit und das Schadenausmaß von Fahrzeugkonfigurationen und wird jährlich aus der Straßenverkehrsunfallstatistik abgeleitet. Diese werden in Typklassen eingeteilt. [245] Ein hoher Typklassenfaktor deutet auf eine höhere Schadenshäufigkeit und/oder höhere Reparaturkosten der Konfigurationen hin und führt zu höheren Versicherungsprämien. Zur Bestimmung des Typklassenfaktors für die betrachtete Nutzfahrzeugkonzept ohne Erkenntnisse aus der Unfallstatistik werden die ermittelten Bewertungsgrößen herangezogen. Das Sicherheitspotenzial der Nutzfahrzeugkonzept beschreibt die Änderung der Schadenhäufigkeit. Es wird

angenommen, dass die Reparaturkosten linear mit den Mehrkosten der Nutzfahrzeugkonzept ansteigen. Der Typklassenfaktor für die betrachtete Nutzfahrzeugkonzept ergibt sich somit aus den Änderungsraten wie folgt:

$$\mathrm{TKF_{i,j,k,l}} = \Delta\mathrm{Reperaturkosten} \cdot \Delta\mathrm{Schadenhäufigkeit} = \frac{\mathrm{FP_{i,j,k,l}}}{\mathrm{FP_{ref}}} \cdot \mathrm{SP_{i,l}^{real}} \quad (35)$$

Das Sicherheitspotenzial für die betrachteten automatisierungsgradspezifischen Nutzfahrzeugkonzepten wird im folgenden Unterkapitel detailliert definiert.

Mit dem technologiespezifische Typenklassenfaktor und dem segmentspezifischen Grundbeitrag lassen sich Versicherungskosten für $\mathrm{Kfz-HPV_{i,j,k,l}}$ und sowie nach selben ansatz auch für $\mathrm{KV_{i,l}}$ wie folgt berechnen:

$$\mathrm{KfzHPV_{i,j,k,l}} = \mathrm{KfzHPV_{i,}^{Basis}} \cdot \mathrm{TKF_{i,j,k,l}} \quad (36)$$

Die Kosten für die Frachtführerhaftpflichtversicherung $\mathrm{FFHPV_{i,j,k,l}}$ basieren auf der Auswertung von Versicherungsverträgen in [246]. Der Mittelwert der segmentspezifischen Jahresbeiträge der Frachtführerhaftpflichtversicherung $\mathrm{FFHPV_{i,j,k,l}}$ ist in Tabelle 31 zusammengefasst.

Tabelle 31: Mittelwert der segmentspezifischen Jahresbeiträge der Frachtführerhaftpflicht-versicherung (eigene Auswertung)

Fahrzeugsegmente	Frachtführerhaftpflichtversicherung $\mathbf{FfHPV_{i,l}}$ [Euro$_{2020}$]
3,5t Transporter	285
7,5t Lkw	476
12t Lkw	476
18t Lkw	696
26t Lkw	803
40t Szm	910

5.3.1 Quantifizierung des Sicherheitspotenzials von Automatisierungskonzepte

Zur Quantifizierung der Sicherheitspotenzials verschiedener Fahrerassistenzsysteme sowie des automatisierten Fahrens für Nutzfahrzeuge ist deren verkehrssicherheitserhöhende Wirkung hinsichtlich der relevanten Verkehrsunfälle zu bewerten. Dabei handelt es sich hierbei um Fahrzeugtechnologien mit potenzieller Wirkung auf die aktive Fahrzeugsicherheit zur Vermeidung von Unfällen durch menschliches Fehlverhalten [247]. Abbildung 20 visualisiert das im Rahmen dieser Arbeit angewandte mehrstufige Auswahlverfahren zur Ermittlung des realisierbaren Sicherheitspotenzials von Automatisierungssystemen.

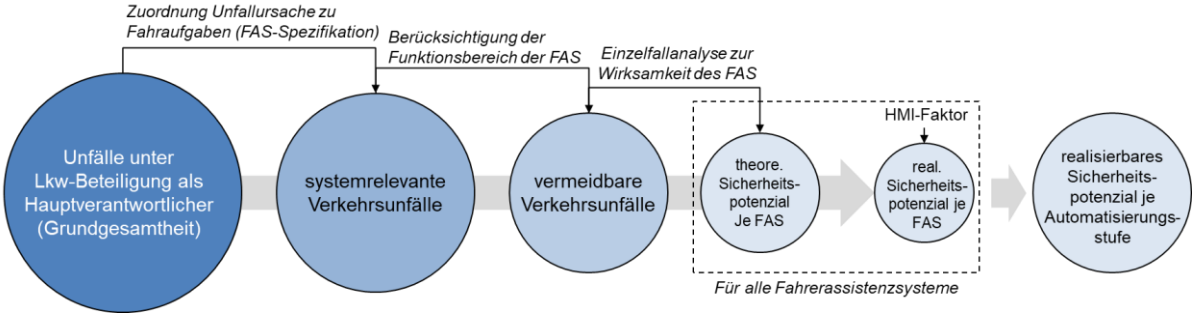


Abbildung 20: Mehrstufiges Auswahlmethode zur Ermittlung des Sicherheitspotenzial von Automatisierungssystemen (eigene Darstellung)

In der Bundesunfallstatistik in [248] sowie in der Unfalldatenbank der verkehrstechnischen Instituts der Deutschen Versicherer in [43] werden Verkehrsunfälle unter Beteiligung von Güterkraftfahrzeugen (als Hauptunfallverursacher) nach Unfallursache, Fahrzeugsegment und Einsatzbereich (Ortslage) unterschieden. Durch die Zuordnung der Unfallursachen zu den verschiedenen Fahraufgaben, die wiederum von Automatisierungssystemen übernommen werden können, lassen sich systemrelevante Unfallarten identifizieren [43]. Die Summe aller systemrelevanten Verkehrsunfälle (Wirkfeld) repräsentiert alle Unfallursachen, die auf Fehleinschätzungen des menschlichen Fahrers zurückzuführen sind und entspricht 90,7 % aller Verkehrsunfälle[43]. Die vermeidbaren Unfälle werden durch die Systemeigenschaften, z.B. Aktivierung des FAS nur bei überschaubarer Verkehrslage mit Tageslicht, mit festgelegten Funktionsbereichen, z.B. bis 60 km/h in Stadtverkehr, eingrenzt. In einer Einzelfallanalyse unter Einbezug der Systemspezifikationen wird die Zuverlässigkeit und Wirksamkeit, also ob ein Unfall vermieden oder nur positiv beeinflusst wird, des Automatisierungssystems ermittelt (Effektivitätsfeld). [249] Diese können retrospektiv aus Erkenntnissen der Verkehrsunfallanalyse oder prospektiv durch simulative Bewertung einer Verkehrssituation mit und ohne Systemeinfluss ermittelt werden. Aufgrund der derzeit noch geringen Marktdurchdringung von Fahrerassistenzsystemen wird das theoretische Sicherheitspotenzial in Studien auf Basis von Verkehrssimulationen ermittelt. Unter Berücksichtigung generischer Systemeigenschaften sind die Ergebnisse aus ausgewählter Studien für leichte und schwere Nutzfahrzeuge differenziert in Tabelle 32 zusammengefasst.

[43] Andere Ursachenfaktoren sind Straße (schlechte Straßenverhältnisse, Witterungseinflüsse oder Hindernisse wie Wildunfälle) 8,2% und Fahrzeug (technische Mängel wie Wartungsmängeln) 1%

Tabelle 32: Theoretisches Sicherheitspotential für Fahrerassistenzsysteme auf Basis Marktuntersuchungen

	Anwendungsbereich			**Theoretisches Sicherheitspotenzial**	
	Stadt	Land	Autobahn	N1	N2/N3
Spurverlassenwarnsystem		X	X	4%	4-7%
Aktive Spurhalteassistent		X	X	-	-
Toter-Winkel-Warnsystem	X	X	X	2%	5%
Abbiegeassistent	X			-	4%
Aktiver Spurwechselassistent	X			-	-
Überholassistent		X	X	-	-
Kollisionswarner	X	X	X	5%	4%
Aktiver Notbremsassistent	X	X	X	20%	12%
ACC	X	X	X	17%	6-7% Urban 8-17% Autobahn
Ein- und Ausparkhilfe	X			2%	1%
Bremsassistent	X	X	X	11%	-
Kreuzungsassistent	X			22-27%	14-16%
ESP	X	X	X	7%	6%
Quelle [250]					

Das theoretische Sicherheitspotenzial des betrachteten FAS und Fahrzeugsegments i gibt somit das Verhältnis der vermeidbaren Unfälle zu alle Verkehrsunfällen an.

$$\mathrm{SP}_{\mathrm{i,FAS}}^{\mathrm{theor}} = \frac{\text{vermiedenen Unfälle (Effektivitätsfeld)}}{\text{alle systemrelevante Unfälle (Wirkfeld)}} \tag{37}$$

Allerdings sind die Einflüsse der Mensch-Maschinen-Interaktion in den Untersuchungsmethoden der berücksichtigten Studien idealistisch definiert. Im realen Verkehrsgeschehen sind Fahrerreaktion und Verhaltensadaption je nach Situation unterschiedlich. Der Human-Maschine-Interface-Faktor (HMI-Faktor) berücksichtigt diese Aspekte und wird auf Basis von Expertenwissen und Fachliteratur für einzelne Automatisierungssysteme definiert [251]. Das realisierbare Sicherheitspotenzial ist somit die Multiplikation des theoretischen Sicherheitspotenzials mit dem HMI-Faktor.

$$\mathrm{SP}_{\mathrm{i,FAS}}^{\mathrm{real}} = \mathrm{SP}_{\mathrm{i,FAS}}^{\mathrm{theor}} \cdot \mathrm{HMI}_{\mathrm{i,FAS}} \tag{38}$$

Unter Berücksichtigung der Methodik zur Kombination von FAS zu Automatisierungsstufen (Kapitel 4.2.3) wird das realisierbare Sicherheitspotenzial für das betrachtete Segment i und der Automatisierungsstufe l ermittelt. Dabei wurde bei der Datenauswahl vorab berücksichtigt, dass sich die Potenziale der einzelnen FAS in ihren Wirkfeldern nicht überschneiden.

$$SP_{i,l}^{real} = \sum (SP_{i,FAS}^{real}) \cdot Streckenanteil \tag{39}$$

In Abbildung 21 ist das berechnete Sicherheitspotential je Automatisierungsgrad und Einsatzbereich die im Rahmen der Berechnung der Versicherungskosten zugrunde gelegt werden abgebildet.

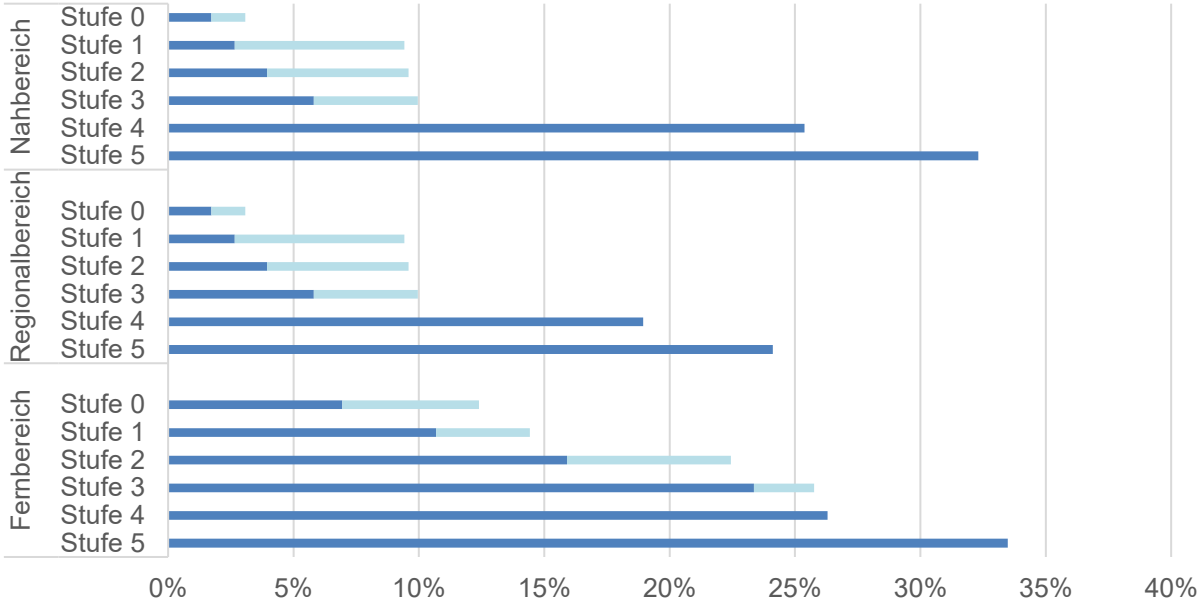


Abbildung 21: Berechnetes Sicherheitspotential je Automatisierungsstufe und Einsatzbereich (dunkle Balken stellen die Mindestpotentiale da, helle Balken die Maximalpotentiale)

5.4 Restwertabschätzung

Um den erwarteten Restwert der betrachteten Nutzfahrzeugkonzepte zum Ende der Haltedauer fundiert zu bestimmen, ist eine technologiespezifische Betrachtung erforderlich. Da die historische Wertentwicklung der betrachteten Technologien zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht vorliegt, ist eine differenzierte Herangehensweise auf Basis verfügbarer, segment- und technologiespezifischer Wertverläufe notwendig.

Für konventionelle Nutzfahrzeuge kann die Wertverlustrate über empirisch abgeleitete Regressionsmodelle abgeschätzt werden, die das Alter sowie die Gesamtlaufleistung zum Verkaufszeitpunkt als erklärende Variablen berücksichtigen [12, 244, 252]. In [244] wurde für verschiedene Nutzfahrzeugsegmente ein Zusammenhang zwischen zurückgelegter Laufleistung und dem Fahrzeugverkaufswert mittels einer exponentiellen Regressionsgleichung auf Basis von Daten vom Gebrauchtfahrzeugmarkt beschrieben. Aus den daraus abgeleiteten segmentabhängigen Regressionsparametern ergibt sich der erwartete Restwert FRW_i

eine Nutzfahrzeug im Segment i, anhand folgender exponentielle Regressionsgleichung:

$$\mathrm{FRW_i} = \mathrm{FP_i} \cdot \mathrm{a} \cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{b} \cdot \mathrm{JFL} \cdot \mathrm{HD}} \tag{40}$$

Dabei bezeichnet $\mathrm{FP_i}$ den Fahrzeugneupreis, JFL die jährliche Fahrleistung (in Tsd. km), HD die Haltedauer (in Jahren), und a, b die segmentabhängigen Wertverlustkoeffizienten (siehe Tabelle 33).

Tabelle 33: Segmentspezifische Regressionsparameter der Exponentialfunktion nach [244]

Fahrzeugsegmente	Parameter a	Parameter b
3,5t Transporter	0,8787	-0,008
7,5t Lkw	0,9061	-0,005
12t Lkw	0,9216	-0,004
18t Lkw	0,8333	-0,004
26t Lkw	0,8801	-0,003
40t Szm	0,9513	-0,002

Besonderheiten Batterie- und Brennstoffzellen-elektrischer Nutzfahrzeuge

Der hohe Fahrzeugpreis von batterie- und brennstoffzellen-elektrischen Nutzfahrzeugkonzepten erfordert die Berücksichtigung des spezifischen Wertverlaufs der Batterie- bzw. Brennstoffzellensystems. Der Kapazitäts- bzw. Leistungszustand dieser Fahrzeugbauteile unterliegt über die Nutzungsdauer einem volatilen Verlauf, insbesondere bei Nutzfahrzeugen mit hoher Auslastung. Daher wird die Abschätzung des Wiederverkaufswerts batterie- und brennstoffzellen-elektrischer Fahrzeuge über die Berücksichtigung des Kapazitätszustandes der Traktionsbatterie sowie Leistungszustandes der Brennstoffzelle bestimmt, diese sich aus zwei Alterungsmechanismen zusammensetzt [253]:

- Kalendarische Alterung: Alterungsprozesse unabhängig von der Nutzung, etwa durch Lagerbedingungen. Hat einen Einfluss vorallem bei der Lithium-Ionen-Batterie.
- Zyklische Alterung: Nutzungsspezifischer Verschleiß durch Lade- und Entladezyklen. Wesentlicher Einfluss für Batterie- und Brennstoffzellensystemen.

Da zyklische Alterung in betrieblichen Anwendungen meist überwiegt, wird sie zur Bestimmung des Gesundheitszustandes (State of Health, SoH) herangezogen.

Gemäß [254] lässt sich der SoH einer Batterie in einer ersten Näherung über die Anzahl vollzogener Ladezyklen und der maximal verfügbaren Ladezyklen (Full Equivalent Cycles (FEC)) abschätzen. Der SoH der Batterie in der betrachteten Nutzfahrzeugkonfiguration $\mathrm{SoH_{i,k,l}}$ am Ende der Haltedauer ergibt sich damit zu:

$$\mathrm{SoH_{i,k,l}} = 1 - \frac{\text{vollzogene Ladezyklen}}{\text{verfügbare Ladezykle (FEC)}} = 1 - \frac{\frac{\mathrm{JFL \cdot HD}}{\mathrm{FR_{i,k,l}}}}{\mathrm{FEC}_{Bat}} \tag{41}$$

Mit JFL: Jahresfahrleistung
HD: Haltedauer
$\mathrm{FR_{i,k,l}}$: Fahrzeugreichweite
FEC_{Bat}: Full Equivalent Cycles der verbauten Batterie

Für Brennstoffzellensystemen ist hingegen die Lebensdauerangabe in Betriebsstunden üblich. Anhand der täglichen Einsatzzeiten der Nutzfahrzeuge in Stunden, werden entsprechend wie für Batterie die verfügbaren Einsatzzyklen FEC_{FC} der Brennstoffzelle abgeleitet und mit der Formel 41 damit der SoH der verbauten Brennstoffzelle in der Nutzfahrzeugkonfiguration $\mathrm{SoH_{i,k,l}}$ gleichermaßen ermittelt.

Zur Erweiterung des Restwertberechnung wird der Fahrzeugrestwert nun als Summe eines fahrzeugpreisbezogenen Anteils ohne Batterie und eines batteriezustandsabhängigen Restwertes angesetzt. Der erwartete Restwert der betrachteten Nutzfahrzeugkonzepte $\mathrm{FRW_{i,j,k,l}}$ ergibt sich mit Fahrzeugneupreis ohne Batterie $\mathrm{FPoB_{i,j,k,l}}$ und Batterieneupreis $\mathrm{BP_{i,j,k,l}}$ damit zu:

$$\mathrm{FRW_{i,j,k,l}} = \mathrm{FPoB_{i,j,k,l}} \cdot \mathrm{a} \cdot \mathrm{e}^{-\mathrm{b} \cdot \mathrm{JFL} \cdot \mathrm{HD}} + \left(\mathrm{BP_{i,j,k,l}} \cdot \mathrm{SoH_{i,k,l}}\right) \tag{42}$$

Zur Ermittlung des erwartete Restwert eines brennstoffzellen-elektrischen Nutzfahrzeugkonzepte wird entsprechend der Preis und der Leistungszustand am Ende der Haltedauer der verbauten Brennstoffzellensystems zusätzlich berücksichtigt.

6 Entwicklung eines integrierten Fahrzeugmarkt-Simulationsmodells zur szenariobasierten Analyse der Technologiediffusion

Die Diffusionstheorie unterscheidet zwischen den Prozessen der Adoption und der Diffusion [255]. Im vorliegenden Kontext bezeichnet Technologieadoption die Einführung neuer Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffe durch Marktakteure im Neufahrzeugmarkt. Die Technologiediffusion hingegen beschreibt die Ausbreitung dieser Technologien im Fahrzeugbestand über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Auf Grundlage der Spezifizierung der Fahrleistungsstruktur des modellierten Fahrzeugbestandes lassen sich ferner die verkehrsbedingten CO_2-Emissionen des Straßengüterkraftverkehrs ermitteln. In diesem Gesamtkontext erfolgt eine systemische Bewertung, die nicht nur die Effizienz neuer Fahrzeugtechnologien, sondern auch den Einflussfaktoren wie Energieinfrastruktur, Nutzungsmuster und den im Bestand vorherrschenden Kraftstoffmix einbezieht. Somit besteht das Ziel dieses Kapitels in der Entwicklung eines integrierten Fahrzeugmarkt-Simulationsmodells, mit dem sich die Diffusionspotenziale von Antriebsstrang- und Automatisierungstechnologien im Nutzfahrzeugmarkt analysieren lassen. Das Modell verknüpft das Entscheidungsverhalten der Marktakteure mit der zeitlichen und strukturellen Marktdiffusion und ermöglicht dadurch die Ableitung der resultierenden Entwicklung der Fahrzeugflotte, des Energieverbrauchs und der CO_2-Emissionen. Da technologische und regulatorische Entwicklungen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind, erfolgt die Analyse auf Basis einer szenariobasierten Modellierung, die unterschiedliche Randbedingungen abbildet.

In Anlehnung an die Allgemeine Modelltheorie nach Herbert Stachowiak lässt sich der Modellierungsprozess hierfür in drei grundlegende Schritte gliedern: Modellabstraktion, Modellaufbau und Modellprüfung [256]. Diese Strukturierung bildet den Rahmen für die systematische Entwicklung des wissenschaftlichen Fahrzeugmarkt-Simulationsmodells: In Kapitel 6.1 erfolgt die Beschreibung der Wechselbeziehungen und Rahmenbedingungen des Realsystems des zu modellierenden deutschen Nutzfahrzeugmarktes, insbesondere der relevanten Marktakteure, ihrer Interessen und gegenseitigen Abhängigkeiten. Auf Basis dieses abstrahierten Modellkonzepts wird in Kapitel 6.2 das Fahrzeugmarkt-Simulationsmodell mit geeigneten wissenschaftlichen Methoden aufgebaut. Es unterteilt sich dabei im Einzeln in die Modellierung des Nutzfahrzeug-Absatzmarktes und der Nutzfahrzeug-Bestandsflotte die die Berechnung der verkehrsbedingten Energie- und CO2-Verbrauch des betrachten Straßengüterkraftverkehrs ermöglicht. Abschließend werden in Kapitel 6.4 und 6.5 im Rahmen der Modellprüfung die Validität und Funktionsfähigkeit (Verifikation) des Modells untersucht, wofür zunächst in Kapitel 6.3 geeignete Basisparameter definiert und überprüft werden.

6.1 Beschreibung der Wechselbeziehungen und Rahmenbedingungen im deutschen Nutzfahrzeugmarkt

Zu Beginn erfolgt eine Umfeldanalyse des deutschen Nutzfahrzeugmarktes, in der die Komplexität realer Systemzusammenhänge im deutschen Nutzfahrzeugmarkt in reduzierter Form dargestellt wird. Ziel ist es, zentrale Einflussgrößen zu bestimmen und zu priorisieren, um daraus Anforderungen für eine geeignete Modellabstraktion und den strukturierten Modellaufbau abzuleiten. Im Fokus stehen dabei insbesondere marktbasierte Maßnahmen, die den Einsatz nachhaltiger Fahrzeugtechnologien und erneuerbarer Energieträger im Straßengüterkraftverkehr fördern sollen. Dabei werden sowohl verkehrs- als auch energiesektorbezogene Maßnahmen berücksichtigt, um sektorübergreifende Wirkzusammenhänge adäquat zu erfassen. Abbildung 22 veranschaulicht den schematischen Untersuchungsrahmen und zeigt die zentralen Akteure und Strukturen des Nutzfahrzeugmarktes sowie deren Verflechtungen mit politischen Rahmenbedingungen und angrenzenden Energiesektor auf.

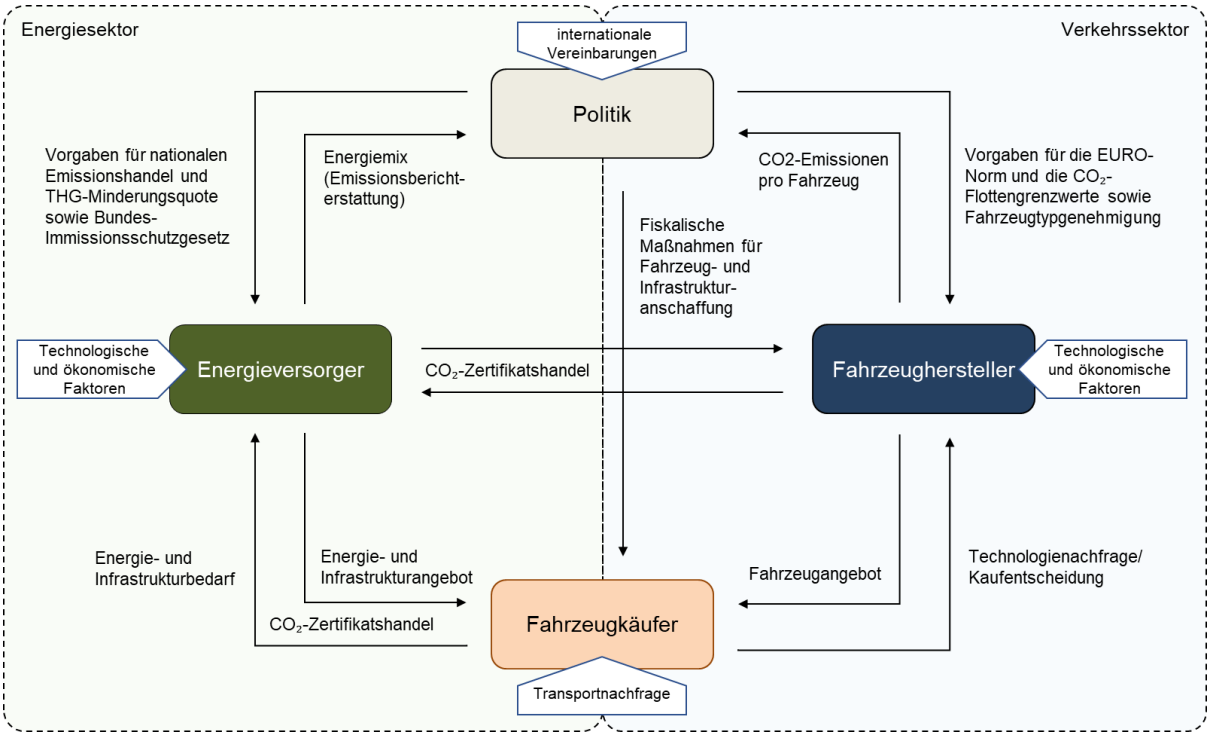


Abbildung 22: Akteure und Strukturen des Nutzfahrzeugmarktes (eigene Darstellung)

Im Zentrum steht die Wechselbeziehung zwischen Nutzfahrzeugherstellern als Anbieter von Fahrzeugtechnologien sowie den Nutzfahrzeugkäufern, deren Nachfrageverhalten die technologische Ausrichtung und Produktionsplanung beeinflusst. Letztere sind in der Regel Flottenbetreiber im Speditionsgewerbe, die im Auftrag von Versendern und im Interesse der Endkunden im Gütermarkt agieren. Sie handeln innerhalb eines kostensensiblen Transport- und Logistikmarktes, in dem das Fahrzeug primär als Produktionsmittel zur Erbringung einer Dienstleistung fungiert.

Entsprechend basieren Kaufentscheidungen stark auf ökonomischen Kriterien, (vgl. Kapitel 2.4).

Für die Markteinführung neuer Nutzfahrzeugmodelle müssen Nutzfahrzeughersteller gesetzliche Mindestanforderungen hinsichtlich Emissionen und Sicherheit einhalten. Im Rahmen der Typgenehmigung werden dabei unter anderem die Einhaltung der aktuellen Schadstoffklasse (Euro-Norm) sowie der verpflichtende Einbau von Fahrerassistenz- und Sicherheitssystemen vorgeschrieben. Von besonderer Relevanz für diese Arbeit sind die **CO_2-Emissionsstandards** für Neufahrzeuge, die sich aus herstellerspezifischen Reduktionsvorgaben auf Flottenebene ergeben. In der Einführungsphase der Regulation bis 2030 wird ein Anreizsystem für emissionsarme und -freie Fahrzeuge sowie finanzielle Sanktionen bei Überschreitung der zulässigen Flottengrenzwerte angewendet. Dabei berücksichtigt der derzeitige Bewertungsansatz die spezifischen Emissionen eines Fahrzeugs ausschließlich auf Basis zertifizierter Verbrauchswerte unter Annahme eines statischen, fossilen Kraftstoffmixes. Der tatsächliche Anteil erneuerbarer Kraftstoffe im Straßenverkehr findet bislang keine Berücksichtigung [257]. Vor diesem Hintergrund wird auf europäischer Ebene zunehmend diskutiert, inwieweit der reale Kraftstoffmix künftig in die Berechnung der herstellerspezifischen Flottenemissionen einbezogen werden sollten. Im Zentrum dieser Debatte stehen drei mögliche Instrumente zur Berücksichtigung erneuerbarer Kraftstoffe innerhalb der CO_2-Regulierung:

- CO_2-Korrekturfaktor (Carbon Correction Factor): Anpassung der zertifizierten fahrzeugspezifischen Emissionen auf Basis des Anteils erneuerbarer Kraftstoffe im tatsächlichen Kraftstoffmix des Straßenverkehrs [257].
- CO_2-Zertifikatshandel: Hersteller erwerben Gutschriften durch die Finanzierung zusätzlicher Beimischung erneuerbarer Kraftstoffe durch Lieferanten, um ihre Flottenemissionen zu senken [258]
- Typgenehmigung CO_2-neutraler Fahrzeuge: Fahrzeuge, die ausschließlich mit CO_2-neutralen Kraftstoffen betrieben werden, werden bei der Typzulassung als emissionsärmer bzw. emissionsfrei bewertet [258, 259].

Aus Sicht von [258] ist der CO_2-Korrekturfaktor der derzeit am häufigsten von Parteien im Europäischen Parlament diskutierte Vorschlag [258]. Allerdings wird gerade dieser Ansatz als klimapolitisch besonders riskant angesehen, insbesondere wegen möglicher Doppelanrechnung mit bestehenden EU-Kraftstoffregelungen wie der RED III, und aufgrund seiner potenziell verwässernden Wirkung auf die CO_2-Standards [258]. Der CO_2-Zertifikatshandel wird ebenfalls kritisch bewertet, unter anderem wegen der Gefahr von Doppelzählungen und mangelnder zusätzlicher Klimawirkung [258]. Die **Typgenehmigung für CO_2-neutrale Fahrzeuge** wird als verhältnismäßig tragfähige Alternative angesehen, sofern die eingesetzten Kraftstoffe strenge Nachhaltigkeits- und Lebenszyklusanforderungen erfüllen. Je nach Position werden

dabei mindestens 70 % bis zu 100 % Treibhausgaseinsparungen gegenüber fossilen Kraftstoffen gefordert [258, 259].

Im Fokus der energiepolitischen Gesetze stehen zudem der **Erneuerbare-Energien-Richtlinie (Renewable Energy Directive, REDIII)** auf europäischer Ebene und das daran angelehnte **Treibhausgas-Minderungsquote (THG-Quote)** in Deutschland, welche Mineralölunternehmen verpflichten, die CO_2-Emissionen ihrer Kraftstoffe gegenüber gesetzlich festgelegte Minderungsquoten zu reduzieren. Für nicht erreichte Minderung folgen, wie bei der CO2-Regulation im Fahrzeugmarkt, entsprechende Strafzahlungen [260]. Um die Quoten zu erreichen, müssen daher erneuerbare Energieträger wie Biokraftstoffe und insbesondere RFNBO (Renewable Fuels of Non-Biological Origin), darunter fallen Wasserstoff und strombasierte Flüssigkraftstoffe, eingesetzt werden. Allerdings müssen diese aus grünem Strom produziert werden, damit diese als RFNBO innerhalb der Quoten angerechnet werden können. [261]

Neben den Einsatz nachhaltiger Kraftstoffe, können die Zielsetzungen auch über den Erwerb von Zertifikate erreicht werden. Speziell für Elektrofahrzeugnutzer gibt es hier die Möglichkeit die CO_2-Einsparungen, die sie durch den emissionsfreien Betrieb ihres Fahrzeugs im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen erzielen, in Form von Zertifikate direkt an Anbieter fossiler Brennstoffe zu verkaufen, diese wiederum ein pauschal festgelegte **THG-Prämien** an die Elektronutzer weitergeben, diese damit für die Fahrzeugbetriebskostenberechnung relevant ist [260].

Grundsätzlich wird das Emissionshandelssystem auf europäischer Ebene durch EU-ETS und nationaler Ebene durch nEHS geregelt [262]. Insbesondere das nationale Emissionshandelssystem nEHS regelt den Handel von Zertifikaten (Verschmutzungsrechte) die ein Energieanbieter (z.B. Kraftstoffimporteure oder -Großhändler) erfordern um die für die voraussichtlichen Emissionen aus in Verkehr gebrachten Brennstoffen abzusetzen [262]. Die Emissionskosten bzw. finanzielle Belastung werden an die Endverbraucher weitergegeben. Der Preis dieser Zertifikate bildet den **CO_2-Preis**, der auf fossile Brennstoffe angerechnet wird. Betroffen sind alle Brennstoffe des Energiesteuergesetzes. Dazu zählen Diesel und Erdgas, auch Biokraftstoffe, falls diese die Nachhaltigkeitskriterien nicht erfüllen. Der CO_2-Preis beeinflusst ebenfalls den Vergleich der Fahrzeugbetriebskosten zwischen den betrachteten Nutzfahrzeugkonzepten wesentlich.

Zudem regelt unteranderem das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) das Kraftstoffangebot für den Fahrzeugmarkt indem definiert, welche Kraftstoffe mit bestimmten chemischen Eigenschaften in den Verkehr gebracht werden dürfen. Daher beeinflusst es die **Zulassung und Regulierung neuer erneuerbarer Kraftstoffe**, da es die Bedingungen definiert, unter denen diese Kraftstoffe in den Verkehr gebracht werden dürfen.

Und schließlich definiert die **AFIR (Alternative Fuels Infrastructure Regulation)** auf europäischer Ebene die Zielsetzungen für den Ausbau der Ladeinfrastruktur sowie der Betankungsinfrastruktur für alternative Kraftstoffe entlang des transeuropäischen Verkehrsnetzes (TEN-T). Dabei sollen sowohl die Hauptverkehrskorridore als auch urbane Knotenpunkte und Regionen mit mittlerem Verkehrsaufkommen bedarfsgerecht berücksichtigt werden.

Vor diesem Hintergrund erscheint es daher sinnvoll, auch die Perspektive der Energieversorger mit in die Modellierung einzubeziehen. Gemeint sind damit Inverkehrbringer von Antriebsenergien sowie Anbieter der jeweils erforderlichen Infrastruktur, also sowohl Kraftstofflieferanten als auch Ladeinfrastrukturanbieter. Diese Akteure stellen die notwendige Energie für den Betrieb der Fahrzeuge bereit und reagieren auf Veränderungen in der Nachfrage, die etwa durch neue Fahrzeugtechnologien, veränderte Kundenanforderungen oder politische Rahmenbedingungen ausgelöst werden. Gleichzeitig wirken die Präferenzen der Fahrzeugkäufer auf die Angebotsstrukturen im Energiemarkt zurück, wodurch eine wechselseitige Abhängigkeit zwischen Fahrzeug- und Energieangebot entsteht, die für technologische und marktwirtschaftliche Betrachtungen von Bedeutung sein kann.

Zusätzlich werden durch **fiskalische Maßnahmen** gezielt Anreize für Fahrzeugkäufer geschaffen, um den Absatz emissionsarmer und -freier Fahrzeuge zu fördern. Dazu zählen unter anderem Investitionszuschüsse für Fahrzeuge und Infrastruktur, Steuererleichterungen wie Kfz- und Energiesteuerbefreiungen sowie Mautbefreiungen für emissionsfreie Fahrzeuge.

Im Gegensatz zur gezielten Förderung elektrischer Antriebe und alternativer Kraftstoffe bestehen derzeit weder in Deutschland noch auf europäischer Ebene marktwirksame Anreize oder regulatorische Vorgaben, die die Einführung automatisierter oder vernetzter Fahrzeugsysteme im Nutzfahrzeugmarkt unterstützen. Die gegenwärtige Regulierung beschränkt sich auf sicherheitsbezogene Mindestanforderungen, während absatzpolitische Maßnahmen zur Förderung der Automatisierung und Vernetzung bislang vollständig ausbleiben. Trotzdem ist die technologische Marktdiffusion automatisierter Systeme im Rahmen der Modellierung mitzugestalten, da sie mittel- bis langfristig den technologischen Gesamtmix, die Flottenzusammensetzung sowie die CO_2-Emissionen im Straßengüterkraftverkehr beeinflussen werden.

6.2 Aufbau des Gesamtmarktmodells zur Technologiediffusion

Zur Abbildung der Adoption von Fahrzeugtechnologien und alternativen Kraftstoffen im Neufahrzeugmarkt sowie der Diffusion dieser Technologien im Bestandsmarkt, jeweils unter Berücksichtigung regulatorischer Maßnahmen und ihrer Auswirkungen auf den CO_2-Verbrauch im Straßengüterkraftverkehr, wird ein kohärentes Gesamtmarktmodell entwickelt. Die Modellstruktur besteht aus zwei miteinander verknüpften Teilen:

1. Ein **agentenbasiertes Fahrzeugmarktmodell** zur Simulation der Neuzulassungen, dass das Zusammenspiel zwischen Angebot und Nachfrage auf dem Fahrzeugmarkt abbildet.
2. Ein **dynamisches Bestandsmodell nach Stock-and-Flow Ansatz** zur Beschreibung der Bestandsflottenentwicklung und der damit verbundenen verkehrsbedingte Energie- und CO2-Verbräuche im Zeitverlauf.

Im Folgenden werden die Berechnungsschritte und die technische Umsetzung beider Modellteile im Detail beschrieben.

6.2.1 Modellierung des Neuzulassungsmarktes

Der erste Modellteil erfasst die Wechselwirkungen zwischen Nutzfahrzeugkäufern, den verfügbaren Fahrzeugkonzepten sowie der zugehörigen Energieinfrastruktur. Dabei basiert die Modellierung auf einem agentenbasierten Ansatz, der das Kaufverhalten unterschiedlicher Käufergruppen im deutschen Neufahrzeugmarkt diskret abbildet. Marktbedingungen und technologische Entwicklungen beeinflussen in diesem Rahmen sowohl die Nachfrage als auch das Angebot. Die Fahrzeug- und Energieinfrastruktureigenschaften werden Bottom-up modelliert, sodass jedem Agenten ein individuelles Set potenzieller Alternativen zur Verfügung steht. Infrastrukturelle Abhängigkeiten bei der Einführung von Fahrzeugtechnologien, insbesondere die einsatz- und zeitspezifischen Verfügbarkeiten der Energieinfrastruktur, werden über einen Infrastrukturagenten berücksichtigt. Auf Basis der individuellen Auswahlmöglichkeiten führt jeder Agent die Kaufentscheidungsfunktion aus, in der technologische, wirtschaftliche und regulatorische Einflussgrößen einfließen. Die aggregierten Entscheidungen aller Agenten ergeben schließlich die zukünftige Neuzulassungsstruktur, differenziert nach Fahrzeug- und Kraftstofftechnologien. Alle Simulationsagenten agieren dabei unter identischen, szenariospezifisch definierten Umgebungsbedingungen. Abbildung 23 zeigt schematisch den Aufbau des agentenspezifischen Fahrzeugmarkt-Simulationsmodells.

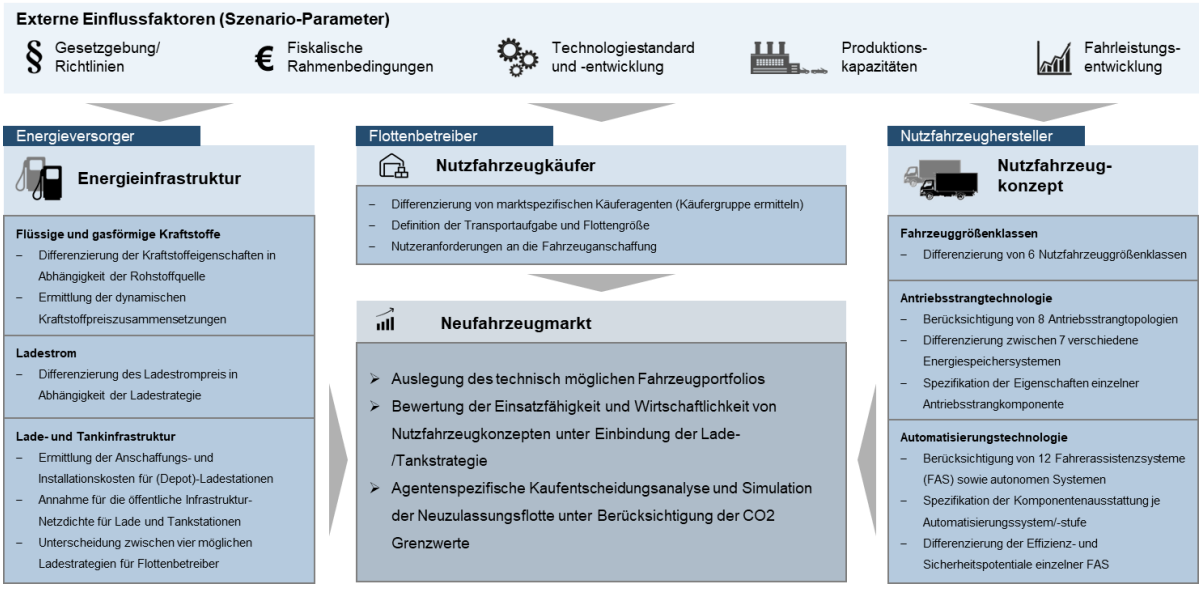


Abbildung 23: Agentenspezifisches Neufahrzeugmarkt-Simulationsmodell (konzeptionelles Modell)

Auf der Nachfrageseite in der Modellstruktur stehen die **Nutzfahrzeugkäufer** (Flottenbetreiber), die im Sinne eines agentenbasierten Ansatzes als einzelne Käuferagenten im Neuwagenmarkt modelliert werden. Jeder Agent repräsentiert den relativen Marktanteil einer spezifischen Käufergruppe innerhalb des Neufahrzeugmarktes. Die Merkmale zur Differenzierung der marktspezifischen Käuferagenten sind so gewählt, dass anhand dieser auch eine empirische Segmentierung des gesamten Neuwagenmarktes möglich ist. Die Summe aller Käuferagenten bildet somit den gesamten deutschen Neufahrzeugmarkt ab. Konsistent zur Marktsegmentierung in Kapitel 2 sowie den Auswertungen in [11] sind damit folgende Merkmale zur Kategorisierung einzelner Käuferagenten herangezogen: Fahrzeugsegment (sechs Segmente), Haupteinsatzweck des Fahrzeugs (drei Transportaufgaben gemäß Kapitel 4.1), Jahresfahrleistung (bis zu 281 Cluster je Segment) und Flottengröße (vier Klassen gemäß [263]: 1 Fahrzeug, 2 bis 3 Fahrzeuge, 4 bis 10 Fahrzeuge und über 11 Fahrzeuge in der Unternehmensflotte). Insgesamt werden damit 628 Käuferagenten in der Marktmodellierung differenziert.

Auf der Angebotsseite stehen die Fahrzeughersteller und Infrastrukturagenten. Diese definieren die Menge technisch möglicher Handlungsalternativen aus verfügbaren Fahrzeugkonzepten, die im betrachteten Zeitraum prinzipiell auf dem Neuzulassungsmarkt angeboten werden können, und zugehöriger Energieinfrastruktur. Der **Fahrzeugherstelleragent** bildet hierzu die Menge möglicher Nutzfahrzeugkonzepte im jeweiligen Betrachtungsjahr ab. Die granulare Kombinationen von 35 Antriebsstrangkonzepten unter Berücksichtigung der verschiedenen Antriebsstrangtopologien und Kraftstoff-Antriebsstrang-Kombinationen sowie vier Automatisierungsstufen entsprechen 140 technisch mögliche Nutzfahrzeugvariationen je Nutzfahrzeugsegmenten bzw. insgesamt 1.980

mögliche Nutzfahrzeugvariationen die innerhalb der Marktmodellierung untersucht werden (siehe auch Kapitel 4,2). Da jedoch nicht alle technisch möglichen Konzepte unmittelbar am Markt verfügbar sind, erfolgt im Modell eine Einschränkung des verfügbaren Technologieangebots. Diese Einschränkung ergibt sich aus der Bewertung des jeweiligen Entwicklungsstandes der Technologien sowie aus regulatorischen Marktbarrieren. Auf Basis der systematische Analyse der marktstrukturellen und gesetzlichen (Szenario) Rahmenbedingungen werden Markteinführungszeitpunkte für einzelne Technologien abgeschätzt. Das Einführungsjahr der betrachteten Nutzfahrzeugkonzepte $\mathrm{EJ}_{\mathrm{i,j,k,l}}^{\mathrm{min}}$ lässt sich somit über folgende Bedingung definieren:

$$\min_{2020 \leq \mathrm{EJ} \leq 2050} \left(\mathrm{EJ_j}\,, \mathrm{EJ_{i,k}}\,, \mathrm{EJ_{i,l}}\right) = \mathrm{EJ}_{\mathrm{i,j,k,l}}^{\mathrm{min}} \leq \mathrm{Simulationjahr} \tag{43}$$

Mit $\mathrm{EJ_j}$ = Einführungsjahr des Energieträgers j

$\mathrm{EJ_{i,k}}$ = Einführungsjahr des Antriebsstrangkonzeptes k für das betrachtete Segment i

$\mathrm{EJ_{i,l}}$ = Einführungsjahr des Automatisierungsgrades l für das betrachtete Segment i

Eine weitere Besonderheit des Fahrzeugherstelleragenten besteht in der Abbildung technologiespezifischer Kostendegressionen in Abhängigkeit der angenommen Produktionsmenge, die durch eine zunehmende Marktdurchdringung einzelner Antriebs- und Automatisierungskomponenten erzielt werden. Da sich das Marktvolumen im heutigen deutschen Nutzfahrzeugmarkt segmentabhängig stark unterscheidet, ergeben sich unterschiedliche Skaleneffekte und damit variierende Produktionskostenpotenziale. Vor diesem Hintergrund werden im Modell spezifische Degressionsraten für bestimmte Komponente getrennt nach Fahrzeugsegmenten angesetzt: einerseits für leichte Nutzfahrzeuge (5,5t Transporter), andererseits für schwere Nutzfahrzeuge (7,5 t Lkw bis 40t Szm). Diese Unterscheidung erfolgt als Bestandteil der definierten Szenariorahmenbedingungen. Die resultierende Marge eines Fahrzeugkonzepts ergibt sich auf Grundlage der in Kapitel 5.3 dargestellten technologiespezifischen RPE-Aufschläge (Retail Price Equivalents).

Der **Infrastrukturagent** (Energieversorger und Infrastrukturanbieter) modelliert ergänzend die Eigenschaften der jeweils erforderlichen Energieinfrastruktur für die verschiedenen Fahrzeugkonzepte ab. Für die Bewertung der betrieblichen Einsatzfähigkeit von Nutzfahrzeugen spielt insbesondere die Verfügbarkeit öffentlich zugänglicher Infrastruktur eine zentrale Rolle. Daher werden je nach Kraftstoffart bzw. Ladeleistung die Infrastrukturnetzdichte als zentrale Größe definiert. Diese beschreibt die räumliche Verteilung der verfügbaren Lade- bzw. Tankstationen in Relation zur Straßennetzlänge [264]. Entsprechend der Differenzierung von Transportaufgaben im Nah-, Regional- und Fernverkehr werden einsatzspezifische Netzdichten bestimmt. Grundlage dafür bilden die jeweils relevanten Straßennetzlängen in Deutschland, gegliedert nach Kreisstraßen, Landes-/Staatsstraßen und Autobahnen. Die

resultierende Energieinfrastrukturnetzdichte $\mathrm{EIND_j}$ wird als mittlere Entfernung zwischen zwei verfügbaren Stationen innerhalb des jeweiligen Einsatzbereichs interpretiert und bildet damit ein Bewertungskriterium für die infrastrukturelle Umsetzbarkeit alternativer Fahrzeugtechnologien.

$$\mathrm{EIND_j} = \frac{\text{Verkehrslänge des Einsatzbereich}}{\text{Stationsanzahl im Einsatzbereich}} \tag{44}$$

Tabelle 34: Wesentliche Merkmale zur Ermittlung der Energieinfrastrukturnetzdichte

	Gütertransport im Nahbereich	**Gütertransport im Regionalbereich**	**Gütertransport im Fernbereich**
Verkehrslänge[44]	*z.B. 37.841 km Verkehrslänge DE Kreisstraßen*	*z.B. 86.924 km Verkehrslänge DE Landes- und Staatsstraßen*	*z.B. 91.829 km Verkehrslänge DE Bundesstraßen und Autobahnen*
Stationsanzahl	*z.B. 800*	*z.B. 80*	*z.B. 200*

Kaufentscheidungsfunktion

Die agentenspezifische Auswahlentscheidung zwischen diskreten Nutzfahrzeugalternativen basiert gemäß den in Kapitel 2.4 definierten kaufentscheidenden Kriterien für Nutzfahrzeugkäufer auf einer mehrdimensionalen Bewertung, wie sie in Abbildung 24 dargestellt ist. Diese umfasst die Bewertung der technischen Einsatzfähigkeit und der wirtschaftlichen Eignung der betrachteten Fahrzeugkonzepte und dient der systematischen Eingrenzung des Lösungsraums.

[44] Straßennetz im überörtlichen Verkehr (Kreisstraßen, Landes- und Staatsstraßen, Bundesstraßen und Autobahn) in Deutschland ist 229.601 km lang [265].

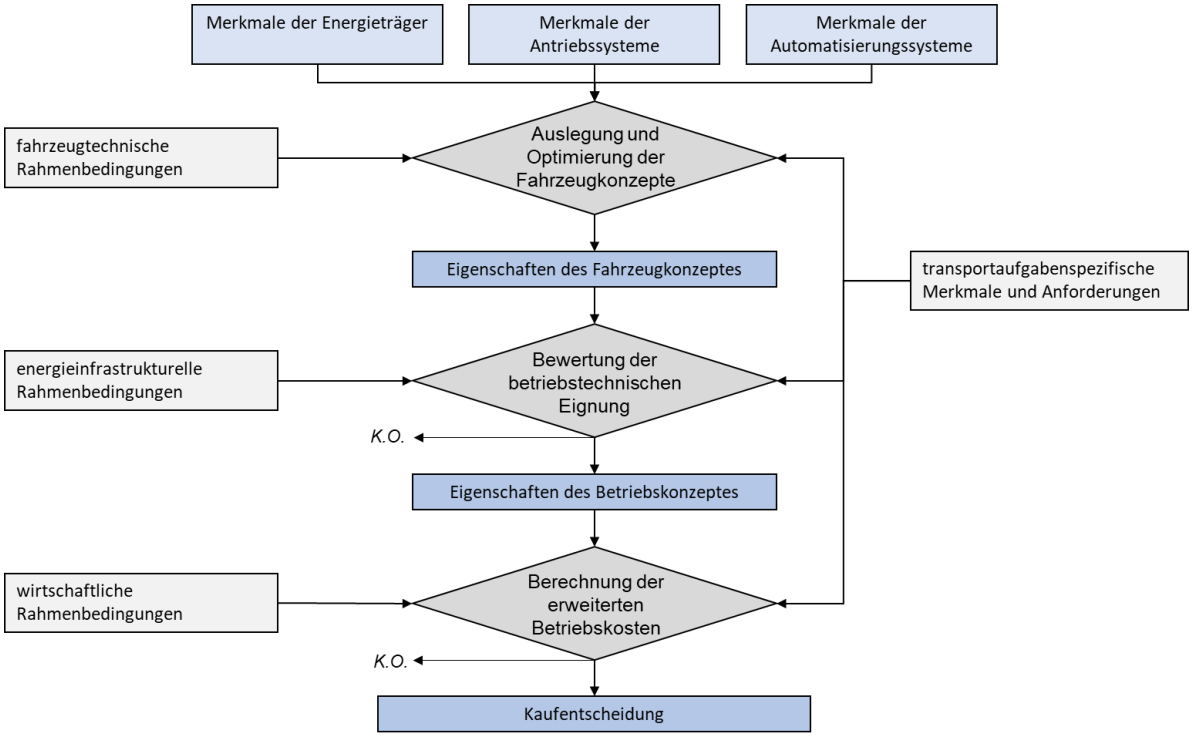


Abbildung 24: Mehrdimensionale Bewertung von Nutzfahrzeugkonzepten (eigene Darstellung)

Im ersten Schritt erfolgt die **Bewertung der Einsatzfähigkeit**. Grundlage hierfür bildet die in Kapitel 4 beschriebene Auslegung antriebs- und automatisierungsgradspezifischer Nutzfahrzeugkonzepte auf Basis der Merkmale der jeweiligen Transportaufgabe sowie der Nutzeranforderungen des Käuferagenten. Dabei werden insbesondere Reichweite, Nutzlast, Nutzvolumen und verfügbare Standzeiten für Lade- bzw. Tankvorgänge berücksichtigt. Ein besonderer Fokus liegt auf der Dimensionierung der Batteriekapazität in Verbindung mit einer geeigneten Ladestrategie, deren Auslegung auf den szenariospezifisch definierten Parametern zur Energieinfrastrukturdichte basiert. Auf dieser Grundlage wird ein Betriebskonzept gebildet, das die Interaktion zwischen Fahrzeug und Infrastruktur beschreibt. Kann für ein Konzept keine ausreichende Integration gewährleistet werden, beispielsweise aufgrund einer unzureichenden Fahrzeugreichweite in Verbindung mit einer zu geringen Infrastrukturnetzdichte, führt die Entscheidungsfunktion zu einem Ausschluss (K.O.-Kriterium).

Für die Bewertung der Einsatzfähigkeit automatisierter Nutzfahrzeuge werden zusätzlich die Merkmale des jeweiligen Einsatzprofils herangezogen. Entscheidend ist hierbei die logistische Bereitschaftszeit, welche beschreibt, ob während der Fahrt über die Fahrzeugführung hinausgehende menschliche Aktivitäten erforderlich sind. Treten solche Aktivitäten auf, wird die Transportaufgabe als nicht automatisierungsfähig eingestuft. Falls zudem empirische Daten zur Bereitschaftszeit für die betrachteten

Fahrzeugsegmente und Einsatzbereiche nicht vorliegen, erfolgt die Bewertung anhand der täglichen Fahrtenanzahl und des Einsatzbereichs. Im Fernverkehr mit wenigen, langen Fahrten, etwa im Hub-to-Hub-Betrieb, wird von einer hohen Automatisierbarkeit ausgegangen. Im Regional- und insbesondere Stadtverkehr mit vielen kurzen Fahrten steigt hingegen die Wahrscheinlichkeit für Interaktionen und dynamische Anforderungen, die eine menschliche Beteiligung erforderlich machen.

Im zweiten Schritt erfolgt die **Bewertung der Wirtschaftlichkeit** der verbleibenden Fahrzeug- und Betriebskonzepte. Grundlage bildet die in Kapitel 5 beschriebene Berechnung der erweiterten Betriebskosten, die neben den klassischen Kostenkomponenten auch CO2-Emissionen- sowie Sicherheitpotential-basierten Kostenstrukturen der Fahrzeuge als bewertungsrelevante Einflussgrößen berücksichtigt. Dadurch wird eine erweiterte RCO-Berechnung (Relevant Cost of Ownership) durchgeführt, die an die spezifischen Einsatzbedingungen des Käuferagenten angepasst ist. Die kalkulatorische Nutzungsdauer wird hierbei abhängig von der Unternehmens- bzw. Flottengröße des Agenten differenziert. Kleinere Flottenbetreiber zeichnen sich durch eine geringere Risiko- und Innovationsbereitschaft aus und fordern daher kürzere Amortisationszeiträume [266] . Mit zunehmender Unternehmensgröße steigt dagegen die Investitionsbereitschaft, wodurch längere Amortisationszeiträume akzeptiert werden. Innerhalb der Modellierung werden hierzu in Abhängigkeit der Unternehmensgröße Amortisationsdauern definiert. Zusätzlich wird die zeitliche Auslastung des Fahrzeugs als entscheidender Faktor der Wirtschaftlichkeit berücksichtigt, insbesondere bei autonomen Nutzfahrzeugkonzepten. Abschließend erfolgt eine Kostenvergleichsrechnung sämtlicher technologischer Fahrzeug- und Infrastrukturkonzepte gegenüber der Referenztechnologie. Dasjenige Fahrzeugkonzept, das für den jeweiligen Agenten die höchste Wirtschaftlichkeit aufweist, wird als präferierte Kaufentscheidung in der Marktmodellierung aggregiert.

Algorithmus zur Abbildung der CO2-Flottenregulierung

Die Berechnung der regulatorisch relevanten CO_2-Flottenemissionen erfolgt auf Basis der aggregierten Entscheidungen aller Simulationsagenten innerhalb eines Fahrzeugsegments. Hierbei wird aus den spezifischen CO_2-Emissionen der einzelnen neuzugelassenen Nutzfahrzeugkonzepte $\mathrm{CO2}_{\mathrm{i,j,k,l}}$ der durchschnittliche CO_2 Emissionen des gesamten Fahrzeugsegments $\emptyset\mathrm{CO2}_{\mathrm{i}}$ ermittelt. Der Flottenwert ergibt sich somit aus dem Quotienten der summierten CO_2-Emissionen der zugelassenen Nutzfahrzeugkonzepte $\mathrm{CO2}_{\mathrm{i,j,k,l}}$ und dem Produkt aus Neuzulassungszahl N_{i} und durchschnittlichen Nutzlast $\emptyset\mathrm{NL}_{\mathrm{i}}$ im betrachten Fahrzeugsegment:

$$\emptyset CO2_i = \frac{\sum CO2_{i,j,k,l}}{N_i \cdot \emptyset NL_i} \quad (45)$$

Die CO_2-Flottenwerte werden für leichte Nutzfahrzeuge in g CO_2/km und für schwere Nutzfahrzeuge in g CO_2/tkm ausgewiesen.

Dabei ergibt sich die spezifischen CO_2-Emissionen eines Fahrzeugs $CO2_{i,j,k,l}$ aus dem Produkt des spezifischen Energieverbrauchs $E_{i,k,l}$ und dem CO_2-Emissionsfaktor des Energieträgers EF_j^{TtW}.

$$CO2_{i,j,k,l} = E_{i,k,l} \cdot EF_j^{TtW} \quad (46)$$

Für PHEV und REEV werden in Abhängigkeit des $UF_{i,j,k,l}$ (Fahranteil) die spezifische CO_2-Emissionen gewichtet.

Die durchschnittliche CO_2 Emissionen des gesamten Fahrzeugsegments $\emptyset CO2_i$ werden schließlich in Bezug auf die szenariospezifisch definierten Zielvorgaben für die CO2-Emissionsreduktion im betrachteten Jahr bewertet. Wird der Zielwert überschritten, erfolgt eine modellinterne Berechnung der Strafzahlungen für jede gCO2 Überschreitung. In der Praxis wurde die mit der Nichteinhaltung der CO_2-Vorgaben verbundenen Strafzahlungen für Nutzfahrzeughersteller eine erhebliche wirtschaftliche Belastung darstellen, da sie die erzielbaren Gewinnmargen übersteigen können und gleichzeitig erhebliche Investitionen in emissionsmindernde Technologien erfordern. Daher ist zu erwarten, dass ein Teil dieser finanziellen Last langfristig auf die Fahrzeugnutzer mit schlechten Emissionswerten übertragen wird, um die Wettbewerbsfähigkeit der Hersteller aufrechtzuerhalten. Weshalb innerhalb der RCO Berechnung im Modell der Listpreise für verantwortliche Fahrzeuge entsprecht erhöht wird. Dieser Mechanismus führt dazu, dass der Fahrzeugmix iterativ so angepasst wird, dass die durchschnittlichen CO_2-Flottenemissionen reduziert werden. Dadurch entsteht ein Rückkopplungseffekt zwischen Kostenstruktur, Kaufentscheidungsalgorithmus und Zielerreichung der CO_2-Flottenregulierung. Zudem sind die Zielvorgaben für die CO_2-Emissionsreduktion für bestimmte Bezugsjahre in der geltenden Gesetzgebung definiert. Um eine diskrete Simulation für jedes Simulationsjahr zu ermöglichen, werden Reduktionstrajektorien erstellt auf Basis einer lineare Interpolation zwischen den Zielvorgaben.

In VECTOR21 ist ein Teil des definierten CO2-Algorithmus bereits implementiert. Im hier verwendeten Modell wurde dieser insbesondere um die Möglichkeit ergänzt, Fahrzeuge mit Typgenehmigung für den ausschließlichen Betrieb mit CO_2-neutralen Kraftstoffen anzurechnen sowie den Grenzwert hinsichtlich verschiedener Einheiten gCO2/km und gCO2/tkm zu berücksichtigen.

6.2.2 Modellierung der Bestandsentwicklung

Der zweite Modellteil bildet die evolutionäre Dynamik der Neufahrzeugtechnologien auf den Gesamtfahrzeugbestand in Form eines Stock-and-Flow-Modells ab. Abbildung 25 veranschaulicht zunächst den schematischen Aufbau zur Berechnung der verkehrsbedingten CO_2-Emissionen unter Einbeziehung alternativer Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffe. Hierbei werden Bestandsagenten definiert, deren Merkmale aus der Bottom-up-Modellierung des Angebots- und Nachfragemodells abgeleitet werden. Die Aggregation dieser Bestandsagenten ermöglicht eine Hochrechnung des verkehrsbedingten Endenergieverbrauchs des Gesamtbestandes unter Verwendung der in Kapitel 2 dargestellten Fahrleistungsstruktur für verschiedene Fahrzeugsegmente im deutschen Nutzfahrzeugbestand. Neben der technologischen Diffusion über den Neuzulassungsmarkt berücksichtigt dieser Modellteil auch szenariospezifische Maßnahmen zur Verbreitung alternativer Kraftstofftechnologien im Bestand. Ebenso wird die dynamische Berechnung von Effizienzpotenzialen durch Automatisierungssysteme in Abhängigkeit von deren Marktdurchdringung abgebildet. Schließlich wird auf Basis der jährlich angenommene Energiemix im Bestand ein, und des Endenergieverbrauchs der Fahrzeugflotte, die Entwicklung der CO_2-Emissionen der Bestandsflotte bis zum Jahr 2050 abgeleitet.

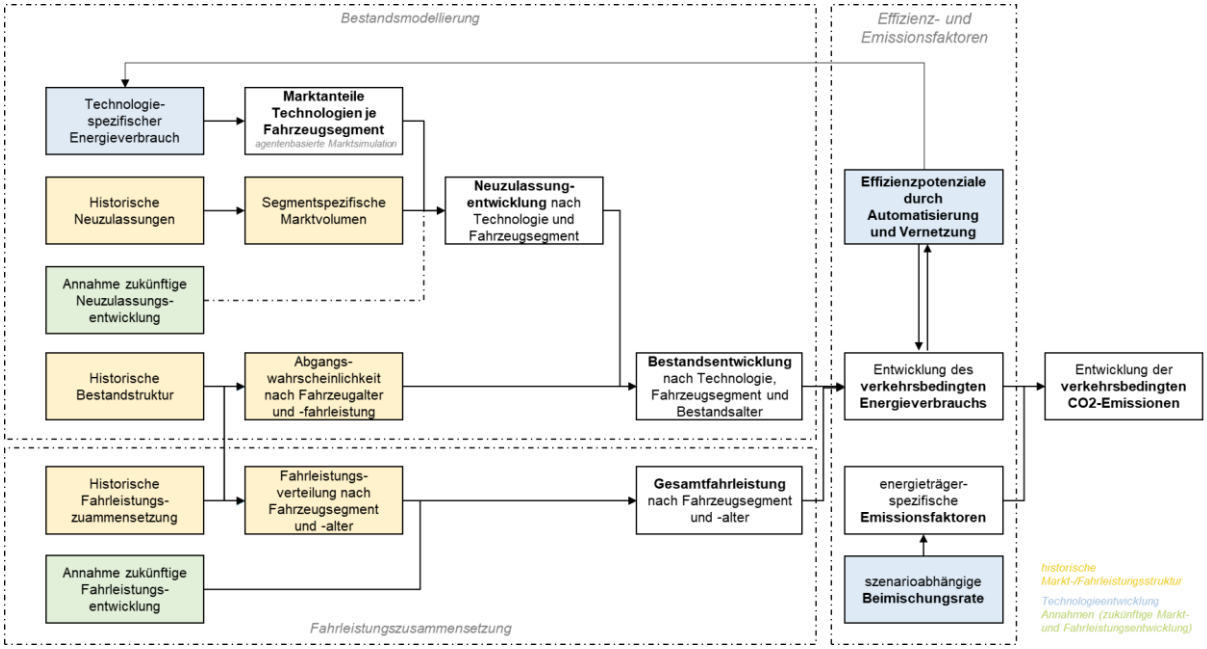


Abbildung 25: Schematische Darstellung zur Berechnung der verkehrsbedingten CO2-Emissionen unter Berücksichtigung alternativer Fahrzeugtechnologien und Kraftstoffe (Konzeptionelles Modell)

Die aus der vorhergehenden agentenspezifischen Simulation abgeleiteten Technologiemarktanteile im Neufahrzeugmarkt fließen in die folgende Bestandsmodellierung ein. Die Bestandsmodellierung wird auf Basis eines klassischen

Stock-Flow-Modell gezeichnet. Dieses beschreibt die dynamische Interaktion von Bestandsgröße (Stock) und Neuzulassungsgrößen (Flow). Die Neuzulassungen N im Jahr t (nach Technologie und Fahrzeugsegment) setzen sich dabei aus den jeweiligen simulierten Marktanteilen $m_{i,j,k,l}(t)$ der betrachteten Technologien je Fahrzeugsegment i im Jahr t sowie den segmentspezifische Marktvolumen n_i (auf Basis ermittelter Neuzulassungsstrukturen, siehe Kapitel 2.1) zusammen.

$$N_{i,j,k,l}(t) = N_i \cdot m_{i,j,k,l}(t) \tag{47}$$

Mit steigendem Fahrzeugalter und Laufleistung steigt die Abgangswahrscheinlichkeit von Nutzfahrzeugen aus dem Bestand [267, 268]. Die Abgangswahrscheinlichkeit wird daher als kombinierte Funktion, die sowohl das Fahrzeugalter a als auch die Gesamtfahrleistung FL (Fahrleistung über gesamte Fahrzeugnutzungszeit) eines Nutzfahrzeuges berücksichtigt. Dabei wird das Ausscheiden eines Nutzfahrzeuges durch die Wahrscheinlichkeit beschrieben, dass entweder das Alter oder die Gesamtfahrleistung als erstes eine kritische Grenze erreicht.

Hierzu wird zunächst die **kumulative Verbleibewahrscheinlichkeit** (in der wissenschaftlichen Literatur häufig als survivability rate bezeichnet) empirisch aus der Häufigkeitsverteilung der Altersstruktur des historischen Nutzfahrzeugbestandes (siehe Kapitel 2.2.2) sowie der Häufigkeitsverteilung der Laufleistungsstruktur des historischen Nutzfahrzeugbestandes (siehe Kapitel 2.3.2) ermittelt. Die Häufigkeitsverteilung sind normiert und mit einer Gaußschen Fehlerfunktion gefittet. Die fahrleistungsbedingte Verbleibewahrscheinlichkeit $s_i^{FL}(FL(a))$ wird dabei in Abhängigkeit der Altersstruktur des Bestandes ermittelt, weshalb eine bedingte Wahrscheinlichkeit zwischen Fahrzeugalter und Laufleistung aufgestellt wird. Insgesamt werden für sechs Nutzfahrzeugsegmenten jeweils alters- s_i^A und fahrleistungsspezifische s_i^{FL} Verbleibewahrscheinlichkeiten abgleitet. Vor allem die maximale Laufleistungsbereich zwischen den Fahrzeugsegmenten unterscheiden sich dabei merklich, weshalb für eine einheitliche über alle Fahrzeugsegmente geeignete Detaillierung 50 Laufleistungsklassen definiert sind, sowie 33 Altersklassen. Der so gezeichnete Verlauf stellt eine Verbleibefunktion für Fahrzeuge eines Neuzulassungsjahrgangs über die Zeit dar. Abbildung 26 zeigt die **alters- und fahrleistungsbedingte Verbleibekurve je Nutzfahrzeugsegment**. Eine nach Technologien differenzierte Verbleibewahrscheinlichkeiten, wie für verschiedenen Antriebsarten, ist allerdings zum Zeitpunkt dieser Arbeit aufgrund unzureichender Marktdurchdringung nicht empirisch ableitbar.

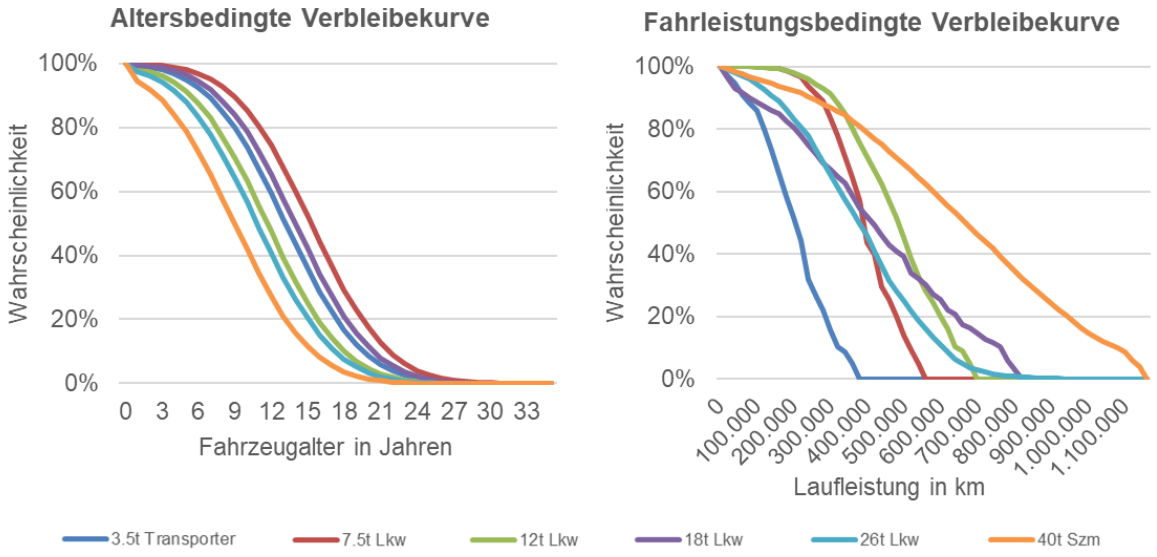


Abbildung 26: Alters- und fahrleistungsbedingte Verbleibekurve je Nutzfahrzeugsegment

Damit bildet sich der Fahrzeugbestand $B_{i,j,k,l}(t)$ im betrachteten Jahr t (nach Technologie, Fahrzeugsegment und Bestandsalter) aus der Summe aller Neuzulassung $N_{i,j,k,l}(t)$ und den alters- und fahrleistungsspezifische Verbleibewahrscheinlichkeiten (insgesamt werden 33 Jahrgangsbestände a_{max} unterschieden).

$$B_{i,j,k,l}(t) = \sum_{0}^{a_{max}} N_{i,j,k,l}(t-a) \cdot s_i^A(a) \cdot s_i^{FL}(FL(a)) \tag{48}$$

Die technologische Zusammensetzung des Bestands ergibt sich durch die kumulative Wirkung der vorangehenden Neuzulassungen, die über Zeit durch unterschiedliche Abgangsraten aus dem Markt ausscheiden. Dies bildet eine evolutionäre Dynamik ab, bei der sich der Bestand über Technologiediffusion und -substitution verändert. Dabei werden die definierten Käuferagenten in der vorhergehenden Simulation über ihre Fahrzeugnutzungsphase als Bestandsagenten innerhalb der Bestandsmodellierung definiert.

Sekundäre Effizienzpotentiale durch Automatisierung und Vernetzung

Hinsichtlich der Automatisierungstechnologien werden die in Kapitel 4.3 beschriebenen automatisierungsgradspezifischen Effizienzpotenziale auf Verkehrsebene dynamisch fortgeschrieben. Während in Kapitel 4.3 die fahrzeugseitigen off-cycle Effizienzpotenziale definiert wurden, wird hier ihre

Abhängigkeit von der Technologiedurchdringung im Bestand berücksichtigt. Damit wird abgebildet, in welchem Umfang sich mit zunehmendem Anteil automatisierter und vernetzter Fahrzeuge Effizienzsteigerungen auch auf Flotten- und Verkehrsebene realisieren lassen. Mit steigendem Vernetzungsgrad können so durch den Betrieb der automatisierten Fahrzeuge im Bestand potentielle, höhere, sogenannte sekundäre, Energieeffizienzen erzielt werden, die über einen Wirkungsfaktor in die jeweils nächste Adoptionsrunde einfließen (vgl. Tabelle 25). Dadurch ergibt sich eine dynamische Anpassung von Effizienzfaktoren innerhalb des Bestands, wie sie in [38] erstmals in Zusammenhang mit zunehmender Marktdurchdringung automatisierter Funktionen beschrieben wurde.

Die Anpassung des spezifischen Energieverbrauchs der Bestandsfahrzeuge im jeweiligen Nutzungsjahr erfolgt somit in Abhängigkeit der Durchdringungsrate DR der betrachteten Automatisierungsstufen und der Effizienzpotenziale EE_l gemäß Kapitel 4.3. Der spezifische Energieverbrauch des Bestandsfahrzeugs im Simulationsjahr t ergibt sich entsprechend zu

$$\mathrm{E_b(t)} = \mathrm{E_b} \cdot (\mathrm{EE_l} \cdot \mathrm{DR_l}) \tag{49}$$

Mit

$$\mathrm{DR_{Stufe\ 3}} = \frac{\mathrm{B_{Stufe\ 3}(t)}}{\mathrm{B_{Stufe1}(t)} + \ldots + \mathrm{B_{Stufe\ 5}(t)}}$$

$$\mathrm{DR_{Stufe\ 4/5}} = \frac{\mathrm{B_{Stufe\ 4}(t)} + \mathrm{B_{Stufe\ 5}(t)}}{\mathrm{B_{Stufe1}(t)} + \ldots + \mathrm{B_{Stufe\ 5}(t)}}$$

6.2.3 Berechnung des verkehrsbedingten Energie- und CO2-Verbrauchs

Zur Berechnung des Endenergieverbrauch und der daraus resultierenden CO_2-Emissionen der Fahrzeugflotte auf der Basis agentenspezifischer Eingaben, sind zunächst die spezifischen Jahresfahrleistungen der einzelnen Fahrzeuge in der Flotte bzw. der Bestandsagenten b zu bestimmen. Auf Basis der in Kapitel 2.3.2 ermittelten Häufigkeitsverteilung der Jahresfahrleistungen für einzelne Fahrzeugsegmente in Abhängigkeit ihres Fahrzeugalter und der daraus empirisch abgeleiteten fahrzeugsegmentspezifischen mittleren Jahresfahrleistung $\mathrm{JFL_b}$ sowie **Regressionsrate rr** (Abhängig von Fahrzeugalter a), lässt sich der altersspezifische Nutzungsverlauf einzelner Bestandsagenten modellieren. Dabei bildet die Summe der spezifischen Jahresfahrleistung aller Bestandsagenten B die Gesamtfahrleistung der Bestandsflotte $\mathrm{JFL_B}$ im betrachteten Jahr t nach Fahrzeugsegment und -alter dar. Zur Berücksichtigung zukünftiger Änderungen in der Transportnachfrage auf der Verkehrsebene (aus Basis von Prognosen der Fahrleistungsentwicklung) wird zudem ein szenarioabhängiger Skalierungsfaktor sf berücksichtigt.

$$\mathrm{JFL_B(t)} = \left(\sum_{b=1}^{B} \mathrm{JFL_b} \cdot (\mathrm{rr})^{a} \right) \cdot \mathrm{sf(t)} \tag{50}$$

Auf Basis des Bottom-up berechneten spezifischen Energieverbrauches des Fahrzeugkonzeptes des Bestandsagenten $\mathrm{E_B}$ (siehe Kapitel 4.3) und der spezifischen Jahresfahrleistung des Bestandsagenten $\mathrm{JFL_b}$ (und Berücksichtigung der alterbedingten typischen Regression $(\mathrm{rr})^{a}$) wird der jährliche Energieverbrauch des Bestandsagenten berechnet. Die Summe aller Bestandsagenten B im betrachteten Simulationsjahr t stellen den jährliche Endenergieverbrauch $\mathrm{E_B}$ der Fahrzeugflotte da.

$$\mathrm{E_B(t)} = \left(\sum_{b=1}^{B} \mathrm{JFL_b} \cdot (\mathrm{rr})^{a} \cdot \mathrm{E_b(t)} \right) \cdot \mathrm{sf(t)} \tag{51}$$

Auf Basis der modellierten Fahrzeugbestandsentwicklung unter Berücksichtigung der Fahrleistungszusammensetzung, der Abgangswahrscheinlichkeiten sowie technologieabhängiger Effizienz- und Emissionsfaktoren wird das Ablaufschema des Modells erweitert, um technologische Potenziale in der Emissionsberechnung geeignet abzubilden.

Die Berechnung der verkehrsbedingten CO_2-emissionen $\mathrm{CO2_B^{TtW}}$ eines Fahrzeugbestandes B im betrachteten Simulationsjahr t wird über die Multiplikation des ermittelten Energieverbrauch aller Bestandsagenten $\mathrm{E_B^{TtW}(t)}$ mit der energieträgerspezifischen Emissionsfaktoren EF multipliziert.

$$\mathrm{CO2_B^{TtW}(t)} = \mathrm{E_B^{TtW}(t)} \cdot \mathrm{EF_{j(TtW)}} \tag{52}$$

Zur Hochrechnung des Endenergie- und CO_2-Verbrauchs für die Anfangsbestände in diesem Simulationsmodell werden die spezifischen Energie- und CO_2-Verbräuche je Fahrzeugsegment aus historischen Datensätzen herangezogen (siehe Tabelle 46 und Tabelle 47).

Für gesamtheitliche Bilanzierung von Kraftstoffen sind die Vorkettenemissionen, daher Energieproduktion, zu definieren. Die Well-to-Tank (WtT) Phase charakterisiert die energetische und CO_2-spezifische Einflüsse, die durch die Herstellung und Bereitstellung des verwendeten Antriebsenergieträgers j entstehen und ermöglicht somit eine Differenzierung nach der Energiequelle in der Bilanzierung. Um diese sowohl als Reinkraftstoffe als auch als komplementäre, CO_2-neutralen bzw. -freie Energieträger in Beimischungen zu den heute im Verkehr eingesetzten fossilen

Energieträgern zu berücksichtigen, wird der CO_2-Verbrauch des Energieträgermixes $\mathrm{CO2}_{\mathrm{mix}}^{\mathrm{WtT}}$ (in g CO_2eq/MJ) nach folgender Formel berechnet:

$$\mathrm{CO2}_{\mathrm{mix}}^{\mathrm{WtT}} = \mathrm{CO2}_{\mathrm{REF}}^{\mathrm{WtT}} \cdot (1 - \mathrm{BR}) + \mathrm{CO2}_{\mathrm{ALT}}^{\mathrm{WtT}} \cdot \mathrm{BR} \quad (53)$$

mit $\mathrm{CO2}_{\mathrm{REF}}^{\mathrm{WtT}}$: THG-Emissionen in g CO_2eq/$MJ_{Energieträger}$ des Referenz-Energieträgers (fossile Energieträger)

$\mathrm{CO2}_{\mathrm{ALT}}^{\mathrm{WtT}}$: THG-Emissionen in g CO_2eq/$MJ_{Energieträger}$ des Alternativ-Energieträgers (CO_2-neural/-freie Energieträger)

BR: zeit-dynamische Beimischungsrate für alternativ-Energieträger (modell-exogen)

Entsprechend Formel (53) wird der Energieeinsatz zur Herstellung und Bereitstellung des Energieträgermixes $\mathrm{EE}_{\mathrm{mix}}^{\mathrm{WtT}}$ [in MJ//MJ] über die spezifische Energieintensitäten für den Referenz-Energieträger $\mathrm{EE}_{\mathrm{REF}}^{\mathrm{WtT}}$ und den Alternativ-Energieträger $\mathrm{EE}_{\mathrm{ALT}}^{\mathrm{WtT}}$ abgeleitet.

$$\mathrm{EE}_{\mathrm{mix}}^{\mathrm{WtT}} = \mathrm{EE}_{\mathrm{REF}}^{\mathrm{WtT}} \cdot (1 - \mathrm{BR}) + \mathrm{EE}_{\mathrm{ALT}}^{\mathrm{WtT}} \cdot \mathrm{BR}) \quad (54)$$

Der Gesamtenergieverbrauch von der Energiequelle bis zum Fahrzeugbetrieb ergibt sich aus den Energiebedarf zur Bereitstellung des Energieträgermixes (Energieintensität) $\mathrm{EE}_{\mathrm{mix}}^{\mathrm{WtT}}$, dem Wirkungsgradverlust η_{xVSE} beim Laden und Tanken und dem streckenbezogenen Fahrzeugverbrauch der Bestandsagenten $\mathrm{E}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{TtW}}(\mathrm{t})$.

$$\mathrm{E}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{WtW}}(\mathrm{t}) = \left(1 + \mathrm{EE}_{\mathrm{mix}}^{\mathrm{WtT}}\right) \cdot (\mathrm{E}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{TtW}}(\mathrm{t}) * \eta_{\mathrm{xVSE}}) \quad (55)$$

Beim elektrischen Laden wird ein Wirkungsgrad der Ladestation (Electric Vehicle Supply Equipement, EVSE) von 98,5% angenommen [225].

Zur Berechnung der Gesamtemissionen $\mathrm{CO2}_{\mathrm{i,j,k,l}}^{\mathrm{WtW}}$ [in g CO_2eq/MJ] werden auf Basis Formel 52 zusätzlich die CO_2-Emissionen der Bereitstellung des Energieträgermixes $\mathrm{CO2}_{\mathrm{j,mix}}^{\mathrm{WtT}}$ berücksichtigt.

$$\mathrm{CO2}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{WtW}}(\mathrm{t}) = \mathrm{E}_{\mathrm{B}}^{\mathrm{TtW}}(\mathrm{t}) \cdot (\mathrm{EF}_{\mathrm{j(TtW)}} + \mathrm{CO2}_{\mathrm{mix}}^{\mathrm{WtT}}) \quad (56)$$

Technische Umsetzung

Die vorgestellte Modellstruktur wurde schließlich in ein ausführbares Modell überführt. Das agentenbasierte Simulationsmodell ist in der vom DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte entwickelten Softwareumgebung VECTOR21 implementiert [269].

Diese Umgebung wurde insbesondere aufgrund der Möglichkeit zur Verarbeitung großer Datenreihen, die sich über die Zeit hinweg stetig ändern (zeitkontinuierliche Simulation), ausgewählt. Die Programmierung erfolgte in der Entwicklungsumgebung IntelliJ. Der vollständige Berechnungscode des Modells mit sämtlichen Funktionen wurden in der Sprache Python programmiert. Dabei wurden die mathematischen Modellgleichungen so umgeformt, dass sie numerisch lösbar sind, und für die Computerausführung in eine diskrete Form überführt. Der Berechnungscode enthält zudem einen vorhandenen Algorithmus zur CO_2-Flottenregulierung, der auf Such- und Sortierverfahren basiert und die Berechnungen auf den simulierten Neuzulassungsdaten aufsetzt. Die Bestandsmodellierung erfolgt in Form eines Zeitreihenmodells auf Excel-Basis, ebenfalls unter Anwendung mathematischer Modellierung und numerisch lösbarer Gleichungen. Das Gesamtmodell durchlief eine Syntax- und Softwareverifikation, die sicherstellt, dass der Code fehlerfrei kompiliert und ausgeführt wird.

6.3 Festlegung der Basisparameter

Für die Simulation werden Anfangswerte festgelegt, die sowohl zeitlich als auch geografisch mit dem Analysegegenstand, dem deutschen Straßengüterkraftverkehr, übereinstimmen. Als Basisjahr dient das Jahr 2020. Auf dieser Grundlage erfolgt eine zeitkontinuierliche Simulation bis zum Jahr 2050. Der Zeitraum bis 2025 wird insbesondere für die Verifikation und Validierung des Modells genutzt, da für diese Jahre historische Marktdaten vorliegen, die einen direkten Vergleich ermöglichen (siehe für die Details Kapitel 6.4 und 6.5).

Die Basisparameter der Simulation umfassen neben den in Kapitel 2 beschriebenen Kenndaten zur Markt- und Fahrleistungsstruktur des deutschen Straßengüterkraftverkehrs sowie den in Kapitel 3 parametrisierten Fahrzeugtechnologien und Energieträgern nach dem aktuellen Stand der Technik auch die Eigenschaften und Anforderungen der betrachteten Käufergruppen. Ergänzend wird die Verfügbarkeit verschiedener Nutzfahrzeugkonfigurationen und der Energieinfrastruktur insbesondere für die Anfangsjahre bis 2025 berücksichtigt, um die realen Marktbedingungen dieser Phase adäquat abzubilden.

In Tabelle 35 sind für die sechs untersuchten Nutzfahrzeugsegmente die jeweils transportspezifischen Merkmale systematisch zusammengefasst. Im folgendem werden ausgewählte Parameter näher erläutert:

- **Jahres- und Tagesfahrleistung**: Zur Abbildung der Entwicklung der Jahresfahrleistung über die gesamte Fahrzeuglebensdauer eines Nutzfahrzeugsegments werden die in Kapitel 2.3.2 dargestellten

fahrzeugsegmentspezifischen mittleren Jahresfahrleistungen sowie die jeweiligen Fahrleistungsregressionsraten herangezogen. Die Referenz-Tagesfahrleistungen ergeben sich aus den mittleren Jahresfahrleistungen in Kombination mit der Anzahl der jährlichen Einsatztage. Um daraus die erforderliche Tagesreichweite für die Abbildung der jeweiligen Transportaufgabe abzuleiten, wird basierend auf den in [270] untersuchten Nutzungs- bzw. Tankverhalten von Nutzfahrzeugen ein Sicherheitspuffer von durchschnittlich +34 % auf die Referenz-Tagesfahrleistungen aufgeschlagen.

- **Tägliche Fahrzeit**: Die Anforderungen an Nutzlast und Nutzvolumen orientieren sich an der durchschnittlichen gravimetrischen sowie volumetrischen Auslastung gemäß [11]. Basierend auf der Befragung der betrieblichen Abläufe von Nutzfahrzeugen in [66] beträgt die durchschnittliche Tageseinsatzzeit von Nutzfahrzeugen in Deutschland für den Standardfall einer Fünf-Tage-Woche über alle Nutzungsprofile hinweg 11,7 Stunden. Davon entfallen im Schnitt 8 Stunden auf reine Lenkzeit (inklusive Stauzeit) und durchschnittlich 3,7 Stunden auf logistische Lenkzeitunterbrechungen (Stand- und Wartezeiten vor der Be- und Entladezone). Die restlichen 12,3 Stunden am Tagesdurchschnitt sind sonstige Standzeiten, wie gesetzliche Lenkzeitunterbrechungen.
- **Tägliche Fahrtenanzahl**: Die tägliche Fahrtenanzahl wird auf Grundlage der in Kapitel 2.3.2 dargestellten Häufigkeitsverteilung der Jahresfahrleistungen und unter Bezugnahme auf [11] abgeleitet. Die transportaufgabenspezifische Gewichtung der Streckenanteile je Fahrzeugsegment erfolgt in Anlehnung an [271]. Die durchschnittliche Nutzungsdauer je Fahrzeugsegment wird gemäß berücksichtigt, während für die wirtschaftlichkeitsbezogenen Berechnungen zusätzlich die Amortisationsdauer nach den gesetzlichen Vorgaben relevant ist [272].
- **Flottengrößen und Amortisationsdauer**: Nach der Statistik „Struktur der Unternehmen des gewerblichen Güterkraftverkehrs und des Werkverkehrs“ [263] betreiben innerhalb der leichten Nutzfahrzeuge in Deutschland besonders viele Unternehmen lediglich ein Fahrzeug (67 % im Jahr 2020). Im Gegensatz dazu sind schwere Nutzfahrzeuge gleichmäßiger auf unterschiedliche Flottengrößen verteilt, wobei Unternehmen mit mehr als 50 Fahrzeugen vergleichsweise selten sind (ca. 2 %). Da kleinere Unternehmen in der Regel über geringere Kapitalreserven verfügen und Investitionen schneller refinanzieren müssen, wird für diese eine verkürzte Amortisationsdauer angesetzt. Größere Flottenbetreiber können demgegenüber längere Abschreibungszeiträume realisieren, wodurch sich eine differenzierte wirtschaftliche Betrachtung nach Flottengröße ergibt.

Tabelle 35: Ausgewählte Merkmale zur Charakterisierung von Transportaufgabe je Fahrzeugsegment

		Fahrzeugsegmente					
	Transportaufgabe	**3,5t Transporter**	**7,5t Lkw**	**12t Lkw**	**18t Lkw**	**26t Lkw**	**40t Szm**
Jahresfahrleistung in km	**Nahbereich**	7.900	38.400	31.400	29.300	29.200	46.000
	Regionalbereich	24.400	55.100	48.500	71.000	68.200	95.500
	Fernbereich	58.900	84.247	55.400	98.700	101.500	168.100
Jährliche Fahrleistungs-regression in %		0,035	0,035	0,05	0,05	0,08	0,10
Erforderliche Tagesreichweite in km	**Nahbereich**	192	207	180	178	178	243
	Regionalbereich	330	281	268	385	361	500
	Fernbereich	612	429	330	512	552	813
Tägliche Fahrtenanzahl	**Nahbereich**	10*	10	5	8	8	8
	Regionalbereich	5*	4	2	3	3	4
	Fernbereich	1*	1	1	2	2	3
Abgeleitete Tägliche Fahrzeit in Std.	**Nahbereich**	7,7	7,8	7,3	7,3	7,3	6,8
	Regionalbereich	8	7,3	7,2	8,8	8,4	8,6
	Fernbereich	5,1		3,7	5,8	6,2	9,4
Gravimetrische Auslastung in %		34%	52%	55%	50%	60%	67%
Volumetrische Auslastung in %		90%	90%	90%	90%	90%	90%
Amortisationsdauer in Jahre		6	5	5	5	5	5
Nutzungsdauer in Jahre		7,1	7,4	6,7	6,1	6,3	5,6
Streckenanteile (Urban – regional - Autobahn)	**Nahbereich**	70% – 20% – 10%					
	Regionalbereich	10% – 80% – 10%					
	Fernbereich	5% – 10% – 85%					
Flottengrößen	**1 Fahrzeug**	0,67			0,21		
	2-3 Fahrzeug	0,24			0,23		
	4-10 Fahrzeug	0,07			0,33		
	Über 11 Fahrzeuge	0,02			0,23		

Quelle: [66, 263, 270, 273] Sowie eigene Berechnung, * Annahmen

Verfügbarkeit verschiedener Nutzfahrzeugkonfigurationen und Energieinfrastruktur bis 2025

Die im Anhang in Tabelle 25 definierten Werte bilden die Grundlage für die im Modell durch den Herstelleragenten definierte Einschränkung der technisch möglichen Fahrzeugkonzepte. Hierfür werden für alle relevanten Energieträger, Antriebsstrangsysteme und Automatisierungsstufen sowohl der Technology Readiness Level (TRL) als auch der Commercial Readiness Level (CRL) ausgewiesen. Der TRL beschreibt den technischen Entwicklungsstand einer Technologie und reicht von frühen Laborerprobungen bis hin zu serienreifen Anwendungen. Der CRL legt fest, ab welchem Zeitpunkt eine Technologie voraussichtlich am Markt verfügbar ist, wobei neben technischen Faktoren auch regulatorische und marktseitige Rahmenbedingungen berücksichtigt werden. [274] Auf dieser Basis erfolgt im Modell eine Einschränkung des prinzipiell großen Technologieraums: Während etablierte Technologien wie konventionelle Dieselkraftstoffe, CNG-Verbrennungsmotoren oder batterieelektrische Antriebe heute verfügbar sind (hohe TRL- und CRL-Werte), werden alternative Kraftstoffe wie OME oder 1-Oktanol sowie hochautomatisierte Fahrfunktionen aufgrund niedrigerer CRL-Werte erst zu einem späteren Zeitpunkt in die Modellierung einbezogen und entsprechende Markteinführungszeitpunkte abgeleitet.

Hinsichtlich der Automatisierungsstufen ist anzumerken, dass gemäß der EU-Verordnung Nr. 2019/2144 ab dem 6. Juli 2022 für die Typgenehmigung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen unteranderem der Einsatz warnende (Müdigkeit- und Aufmerksamkeitswarner[45], intelligenter Geschwindigkeitswarner/-regler, Rückfahrassistent[46], Spurwechselwarner[47]) und eingreifende (Notfall-Spurhalteassistent, Notbremsassistent)[48] FAS bereits verbindlich vorgeschrieben ist [9]. Die Verordnung schreibt auch Systeme wie Reifendrucküberwachungssystems[49], Unfalldatenspeicher und Notbremslicht vor. Damit entspricht die FAS-Konfiguration ab 2022 der Automatisierungsstufe 2 „teilweise Automatisierung“, da die Quer- und Längsführung in bestimmten Situationen (Notsituationen) aktiv von den FAS übernommen wird. Auf eine Differenzierung der Stufe 0 und 1 wird daher im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

---

[45] Überwachung der Fahrerverfügbarkeit für automatisierte Fahrfunktionen

[46] Entspricht der Ein- und Ausparkhilfe in Abbildung 16

[47] Auch bekannt als Toter-Winkel-Warner; nur bei schwere Nutzfahrzeuge der Klasse N2 und N3

[48] Notfall-Spurhalteassistent und Notbremsassistent waren bereits 2015 für schwere Nutzfahrzeuge (N2, N3) verpflichtend.

[49] nur bei schwere Nutzfahrzeuge der Klasse N2 und N3

Hinsichtlich der Energieinfrastruktur wird ergänzend die räumliche Verfügbarkeit der jeweils erforderlichen Lade- bzw. Tankstellen berücksichtigt, da sie die betriebliche Einsatzfähigkeit alternativer Nutzfahrzeugtechnologien maßgeblich bestimmt. Im Anhang in Abbildung 55 ist die im Jahr 2024 bestehende Energieinfrastrukturnetzdichte für verschiedene Kraftstofftankstellen und Ladestationen im deutschen Straßengüterkraftverkehr bestimmt und visuell dargestellt. Die Werte basieren auf der in Kapitel 6.3 beschriebenen Methodik zur Berechnung der mittleren Netzdichte und differenzieren nach den Einsatzbereichen Nah-, Regional- und Fernverkehr.

6.4 Modellverifikation anhand Parametersensitivität

Zur Beurteilung der Eignung und Qualität des Computermodells im Hinblick auf seine Qualifikation für Marktanalysen ist eine Prüfung der zentralen Modellfunktionen erforderlich. Diese erfolgt über die beiden Schritte Modellverifikation und Modellvalidierung, siehe Abbildung 27. Die Modellverifikation dient dem Nachweis, dass das konzeptionelle Modell korrekt umgesetzt wurde und die Simulation verlässliche sowie reproduzierbare Ergebnisse liefert. Dabei steht weniger der Abgleich mit realen Daten im Vordergrund, sondern vielmehr die Überprüfung, ob die Ergebnisse insgesamt konsistent und plausibel erscheinen. Die Modellvalidierung hingegen hat das Ziel, die Gültigkeit der Simulationsergebnisse im Vergleich zur Realität zu belegen. [275] Hierzu werden identische Eingangsgrößen in Modell und Realität herangezogen, sodass überprüft werden kann, ob die Resultate übereinstimmen. Damit wird sichergestellt, dass das Modell nicht nur methodisch korrekt programmiert, sondern auch inhaltlich belastbar ist und eine fundierte Grundlage für Marktanalysen bietet.

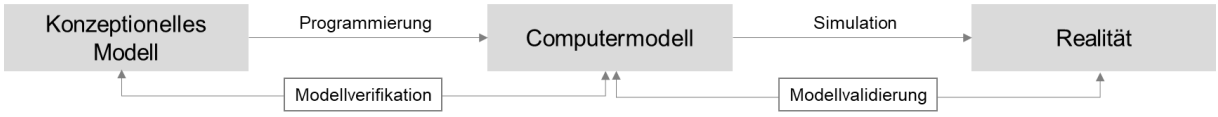


Abbildung 27: Übersicht Modellverifikation und -validierung (eigene Darstellung auf Basis von [275])

Zur Überprüfung der Funktionsweise des Fahrzeugmarktmodells erfolgt eine Verifikation über die Sensitivitätsanalyse ausgewählter Modellparameter. Dabei wird untersucht, in welchem Maße zentrale Eingangsgrößen die berechneten Ausgangsgröße, insbesondere die Neuzulassungsanteile alternativer Antriebstechnologien, beeinflussen. Da die Zahl potenziell relevanter Eingangsparameter des Fahrzeugmarktmodells jedoch sehr hoch ist, erfolgt die Analyse exemplarisch anhand wesentlicher Einflussgrößen, die für den Markthochlauf alternativer Kraftstoffe, alternativer Antriebsstränge sowie Automatisierungskonzepte eine zentrale Bedeutung haben. Abbildung 28 zeigt die Veränderung der

Neuzulassungsanteile konkurrierender Technologien durch die Variation dieser Parameter im Vergleich zum Referenzfall (ohne entsprechende Berücksichtigung).

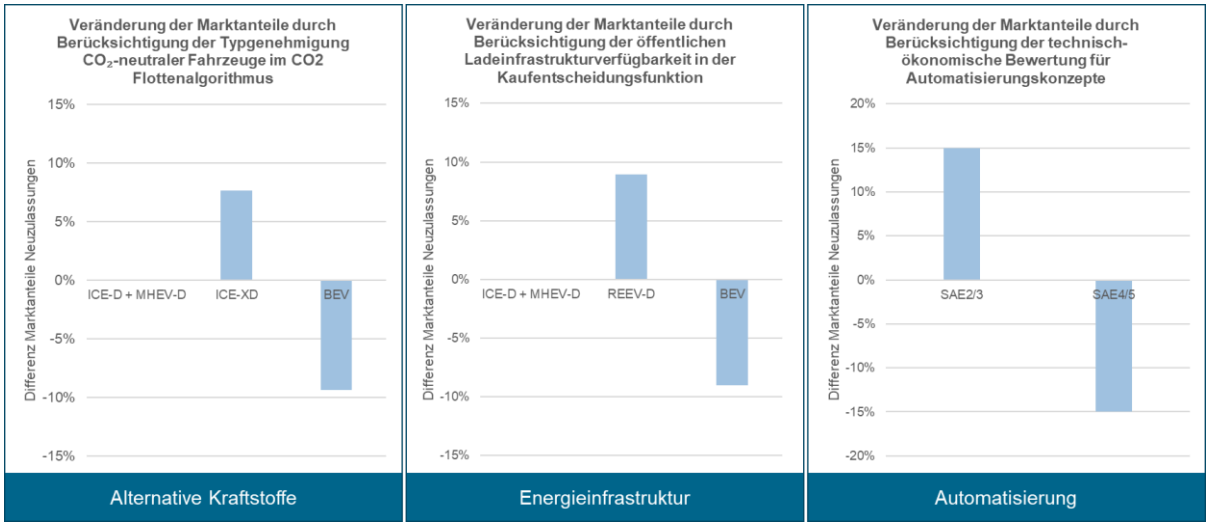


Abbildung 28: Veränderung der Neuzulassung-Marktanteile durch Berücksichtigung alternativer Kraftstoffe, Energieinfrastruktur und Automatisierung gegenüber dem Referenzfall ohne entsprechende Berücksichtigung

In der linken Darstellung der Abbildung 28 wird der Einfluss der Berücksichtigung CO2-neutraler Kraftstoffe im Rahmen der CO_2-Flottenregulierung analysiert. Verbrennungsmotorische Antriebskonzepte (ICE), die ausschließlich mit strombasierten Kraftstoffen (XD) betrieben werden, erhalten in der regulären Flottenbewertung bislang keine Berücksichtigung als CO_2-neutrale Fahrzeuge. Wird dieser Aspekt im Modell hingegen einbezogen, steigt der Marktanteil der ICE-XD im Beispieljahr 2030 um rund 8 %, während der Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV) entsprechend um etwa 8 % sinkt. Die Marktanteile konventioneller Diesel- und Mild-Hybrid-Konzepte (ICE-D und MHEV-D) bleiben dabei unverändert.

Die mittlere Darstellung in Abbildung 28 zeigt die Sensitivität gegenüber der Verfügbarkeit öffentlicher Ladeinfrastruktur. In diesem Simulationslauf wird eine geringe Infrastrukturnetzdichte im Jahr 2030 angenommen. Da die CO_2-Reduktionsziele der Flottenregulierung dennoch erfüllt werden müssen, entscheiden sich die Simulationsagenten verstärkt für Range-Extended Electric Vehicles (REEV), die geringere Anforderungen an die Ladeinfrastruktur stellen, aber dennoch zur CO2 Reduktion beitragen. Dadurch steigt der Marktanteil der REEV um rund 12 %, während der Anteil der BEV um etwa 9 % sinkt. Die Marktanteile konventioneller Dieselantriebe bleiben auch hier stabil. Dieses Ergebnis bezieht sich auf Simulationsagenten, deren Ladeverhalten auf öffentliche Infrastruktur angewiesen ist. Für Akteure mit eigener Depotladeinfrastruktur führt die eingeschränkte öffentliche Ladeverfügbarkeit hingegen zu keiner Marktveränderung.

In der rechten Darstellung der Abbildung 28 wird schließlich die Sensitivität gegenüber der technischen und ökonomischen Bewertung von Automatisierungskonzepten gezeigt. Neben den betriebskostenbezogenen Effekten (z. B. reduzierte Personalkosten) wird hier auch die technische Einsatzfähigkeit für spezifische Transportaufgaben berücksichtigt. Das Modell zeigt, dass die Marktanteile hochautomatisierter Fahrzeugkonzepte (Stufe 4/5) im Beispieljahr 2040 um rund 5 % sinken, wenn in der Kaufentscheidungsmodellierung die Bewertung der technische Einsatzfähigkeit einbezogen werden. Entsprechend erhöht sich der Anteil teilautomatisierter Konzepte (Stufe 2/3) um etwa denselben Wert.

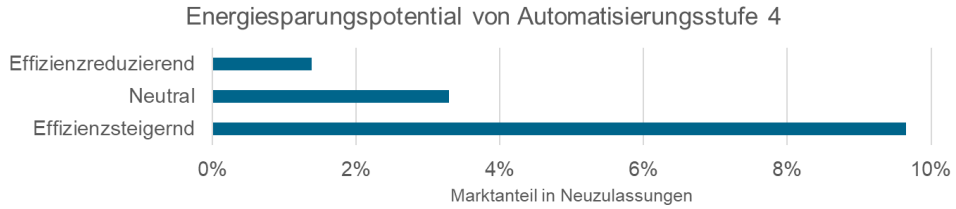


Abbildung 29: Veränderung des Marktpotenzials von Fahrzeugkonzepten mit Automatisierungsstufe 4 im Segment 40 t Sattelzugmaschinen im Fernverkehr unter verschiedenen Annahmen zur Energieeffizienzwirkung

Zur ergänzenden Überprüfung ist in Abbildung 29 das Energiesparpotenzial automatisierter Konzepte der Stufe 4 im Fernverkehr analysiert. Dabei wird das Marktpotenzial für 40t Szm unter unterschiedlichen Annahmen zur Energieeffizienzwirkung variiert. Es zeigt sich, dass sich bei einem als energieeffizient angenommenen Fahrbetrieb der Marktanteil der Stufe 4 Konzepte um bis zu 10 % erhöht, während eine neutral oder energieverbrauchssteigernd angenommene Wirkung zu deutlich geringeren Marktanteilen führt. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt damit die erwarteten Wirkungsrichtungen des Modells.

6.5 Modellvalidierung anhand historischen Marktdaten

Grundsätzlich lässt sich die Validität eines Modells in drei Dimensionen unterscheiden: Struktur-, Verhaltens- und Datenvalidität [275]. Die **Strukturvalidität** bezieht sich in diesem Zusammenhang darauf, ob die grundlegende Struktur des Fahrzeugmarktes und seiner Bestandsentwicklung im Modell realitätsnah abgebildet ist. Hierfür wird im Modell der Fahrzeugbestand auf Basis definierter Verbleibekurven und der jährlichen Neuwagenflotte fortgeschrieben. Abbildung 30 zeigt für das Jahr 2030 die resultierende Verteilung des Fahrzeugbestands, der gesamten jährlichen Fahrleistung sowie des daraus abgeleiteten Endenergieverbrauchs nach Fahrzeugsegmenten. Die modellseitige Verteilung des Fahrzeugbestands stimmt dabei annähernd mit den historischen Daten der amtlichen Statistik überein. Auch die Fahrleistungsverteilung spiegelt die in Kapitel 2 dargestellten Beobachtungen wider, wonach schwere Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 t den größten Anteil an der Gesamtfahrleistung aufweisen. Im Ergebnis entfallen auf diese Fahrzeugklasse

zudem rund 50 % des gesamten Endenergieverbrauchs im Straßengüterkraftverkehr. Damit bestätigt die Strukturvalidierung, dass die im Modell abgebildete Zusammensetzung des Bestands, die daraus resultierende Fahrleistungsstruktur und der Energieverbrauch in plausibler Übereinstimmung mit den empirischen Marktstrukturen stehen.

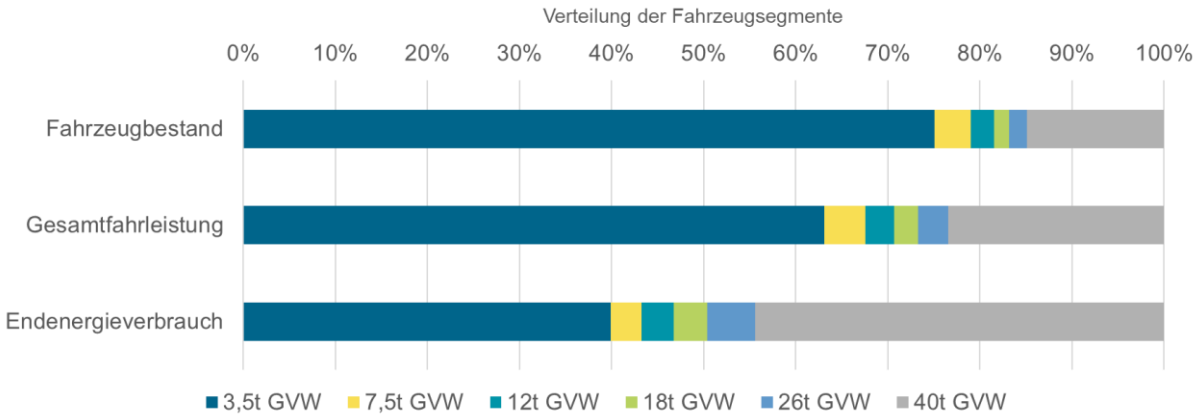


Abbildung 30: Verteilung des Fahrzeugbestands, der Gesamtfahrleistung und des Endenergieverbrauchs nach Fahrzeugsegmenten im Jahr 2030

Hinsichtlich des spezifischen Energieverbrauchs der Fahrzeuge erfolgt die Validierung des Modells durch den Vergleich der simulierten Verbrauchswerte der betrachteten Nutzfahrzeugkonzepte mit den für regulierte Fahrzeugsegmente verfügbaren Referenzdaten. Hierzu werden die im Rahmen der europäischen CO_2-Regulierung durch das VECTO-Modell (Vehicle Energy Consumption Calculation Tool) der Europäischen Kommission veröffentlichten Verbrauchswerte herangezogen. Das VECTO-Modell bildet derzeit insgesamt 17 Fahrzeugklassen ab, die sich primär nach zulässigem Gesamtgewicht, Achskonfiguration und typischem Einsatzprofil unterscheiden. Für den vorliegenden Vergleich wurden insbesondere die Klassen 4, 5 und 9 herangezogen, für die offizielle Werte im Jahr 2022 im Rahmen des jährlichen Monitorberichts vorliegen [276]. Da VECTO, ebenso wie das in dieser Arbeit entwickelte Modell, auf einer längsdynamischen Berechnungslogik basiert, sind die grundlegenden methodischen Ansätze beider Modelle vergleichbar.

Abbildung 31 zeigt den durchschnittlichen spezifischen Verbrauch schwerer, in Deutschland im Jahr 2022 zugelassener Dieselnutzfahrzeuge im Vergleich zu den im Rahmen dieser Arbeit simulierten Werten. Insgesamt ergibt sich über die betrachteten Fahrzeugsegmente eine gute Übereinstimmung zwischen hier simulierten Werten und den Referenzwerten aus Vecto (in Abbildung 31 kennzeichnen die Balken die Bandbreiten der Verbrauchsdaten verschiedener vergleichbarer Fahrzeugsegmente). Lediglich in zwei der vier Segmente zeigen sich geringfügige Abweichungen, die sich

vermutlich aus leicht unterschiedlichen Annahmen zur Gewichtung der Streckenanteile und zur mittleren Beladung erklären lassen.

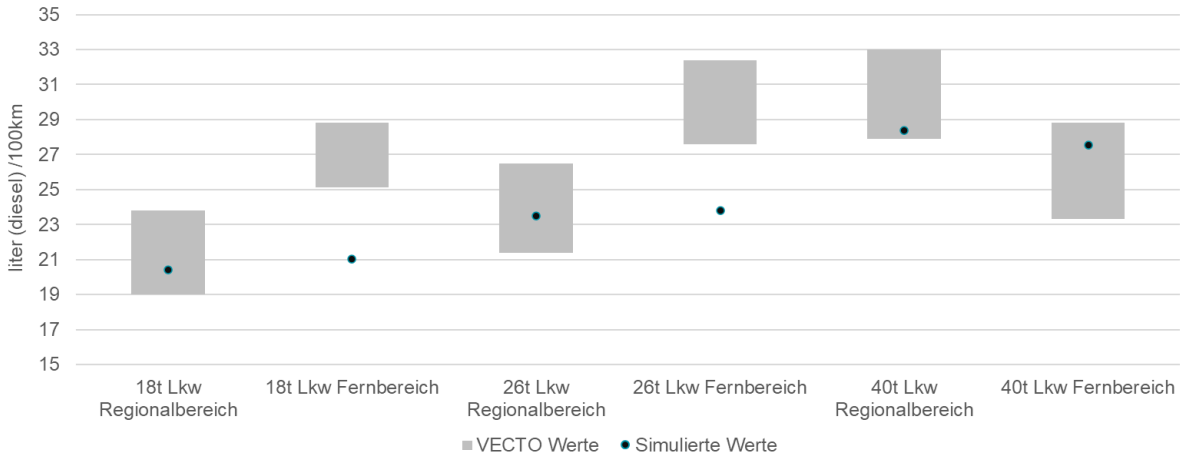


Abbildung 31: Vergleich der simulierten und VECTO-basierten Energieverbräuche schwerer Dieselnutzfahrzeuge in Deutschland

Darüber hinaus lässt sich auch für leichte Nutzfahrzeuge eine enge Annäherung an empirische Durchschnittswerte feststellen. Der durchschnittliche Verbrauch von in Deutschland im Jahr 2024 zugelassenen leichten Dieselfahrzeugen beträgt 217,3 g CO_2/km [277]. Im Fahrzeugmarktmodell ergibt sich ein Rückgang der modellierten Verbrauchswerte von 232,7 g CO_2/km im Simulationsjahr 2020 auf 222 g CO_2/km im Jahr 2024, womit die modellierte Entwicklung realistische Effizienzfortschritte abbildet.

Zur Überprüfung der **Datenvalidität** des Fahrzeugmarktmodells erfolgt eine Gegenüberstellung der simulierten Marktentwicklung mit den realen Marktanteilen nach Fahrzeugsegmenten. Damit wird überprüft, ob das Modell die beobachteten Markttendenzen realitätsnah abbildet und die zugrunde gelegten Annahmen zu den Diffusionsraten alternativer Antriebstechnologien konsistent mit der tatsächlichen Marktdynamik sind.

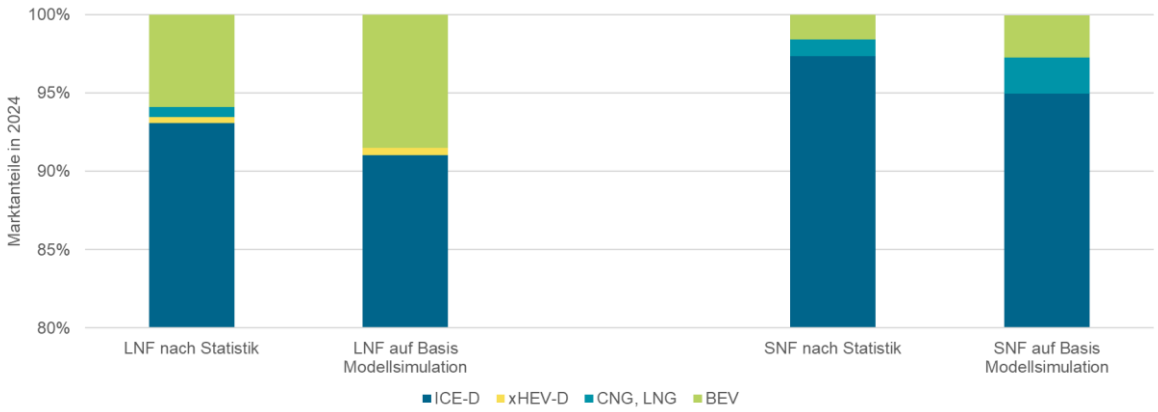


Abbildung 32: Vergleich modellierter und statistisch erfasster Marktanteile konventioneller und alternativer Antriebskonzepte im Jahr 2024

Abbildung 32 zeigt den Vergleich zwischen den modellierten Marktanteilen im Jahr 2024 und den statistisch erfassten Neuzulassungsanteilen für leichte (LNF) und schwere Nutzfahrzeuge (SNF) in Deutschland. Grundlage der Referenzdaten bilden die amtlichen Neuzulassungsstatistiken [57], während die modellbasierten Werte auf den in Kapitel 6 beschriebenen Marktverhaltensfunktionen beruhen.

Die **Verhaltensvalidität** überprüft, ob das Modell in der Lage ist, das reale Kaufverhalten und die Technologieakzeptanz der Marktakteure realistisch zu simulieren [275]. Im Zentrum steht dabei die Frage, ob die modellinternen Entscheidungsmechanismen zu plausiblen Marktadoptionsprozessen führen und damit die beobachteten Veränderungen in den Marktanteilen neuer Technologien reproduzieren. Die im Rahmen der Modellverifikation durchgeführten Sensitivitätsanalysen zeigen, dass das Modell auf Veränderungen zentraler Einflussgrößen, wie regulatorische Rahmenbedingungen, Infrastrukturverfügbarkeit oder Betriebskostenstrukturen, in erwarteter Richtung reagiert. Damit ist anzunehmen, dass die zugrunde liegenden Entscheidungsfunktionen ein realitätsnahes Marktverhalten abbilden und die Verhaltensvalidität erfüllt ist.

Insgesamt kann somit festgestellt werden, dass das Fahrzeugmarktmodell die Anforderungen an Struktur-, Verhaltens- und Datenvalidität erfüllt und damit eine hinreichende Genauigkeit und Konsistenz für die anschließenden Szenarioanalysen aufweist. Ziel der Validierung war dabei nicht die Prüfung der exakten Vorhersagegenauigkeit zukünftiger Marktanteile, sondern die Bestätigung der kausalen Nachvollziehbarkeit der Simulationsergebnisse.

7 Szenarioanalyse des deutschen Straßengüterkraftverkehrs bis 2050

Auf Grundlage des entwickelten Fahrzeugmarktmodells werden im Folgenden verschiedene Szenarien analysiert, die unterschiedliche technologische Entwicklungen und politische Rahmenbedingungen beschreiben und damit einhergehende Auswirkungen auf Fahrzeugbestand, Energieverbrauch und CO_2-Emissionen des deutschen Straßengüterkraftverkehrs bis 2050 abbilden. Während die ersten beiden Szenarien verschiedene Dekarbonisierungspfade über direkte und indirekte Elektrifizierung adressieren, beschreibt das dritte Szenario einen technologiegetriebenen Entwicklungspfad mit Schwerpunkt auf Automatisierung von Nutzfahrzeugen. Dabei ist anzumerken, dass im Mittelpunkt von absatzwirtschaftlichen Diffusionsmodellen nicht die exakte Prognose zukünftiger Marktentwicklungen stehen [278], sondern hier die systematische Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen technologischen, ökonomischen und regulatorischen Einflussgrößen und deren Auswirkungen auf die Antriebs- und Energieträgerwahl sowie den Automatisierungsgrad der Nutzfahrzeuge im Fokus steht. In Kapitel 7.1 werden zunächst die Szenarien und ihre zugrunde liegenden Rahmenbedingungen beschrieben. In Kapitel 7.2 werden die daraus abgeleiteten technologischen Marktpotenziale und Bestandsentwicklungen ausgewertet. Darauf aufbauend werden in Kapitel 7.3 die entsprechenden Fahrleistungs- und Energieentwicklungen des Straßengüterverkehrs untersucht. Abschließend werden in Kapitel 7.4 die Ergebnisse eingeordnet, mit bestehenden Studien verglichen und deren Implikationen für zukünftige Entwicklungen diskutiert.

7.1 Beschreibung der Szenarien und ihrer Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel werden die Annahmen und Rahmenbedingungen der Szenarien erläutert, die die Grundlage für die anschließende Modellierung und Bewertung bilden. Im Mittelpunkt stehen dabei insbesondere CO_2-basierte Marktmechanismen, energieinfrastrukturelle Ausbaupfade sowie fahrzeugtechnologische Entwicklungspotenziale, die den Hochlauf alternativer Antriebs- und Automatisierungskonzepte im Straßengüterkraftverkehr maßgeblich bestimmen.

7.1.1 Referenzszenario: Direkte Elektrifizierung

Das Referenzszenario „Direkte Elektrifizierung“ orientiert sich an den gegenwärtigen politischen und ökonomischen Rahmenbedingungen, die eine weitere Zunahme der Elektrifizierung im Straßengüterkraftverkehr begünstigen. Es beschreibt eine Entwicklung, in der sich der Hochlauf batterieelektrischer, brennstoffzellen-elektrischer und hybrider Nutzfahrzeugkonzepte unter dem Einfluss bestehender

Marktmechanismen, CO_2-Regulierungen und Förderinstrumente weiter verstärkt. Die Dekarbonisierung erfolgt dabei vorrangig über die direkte Elektrifizierung des Antriebsstrangs, womit das Szenario eine kontinuierliche Beschleunigung der aktuellen Markt- und Technologieentwicklungen abbildet und als Referenzszenario für die weiteren Analysen dient.

Zentral für die Ausgestaltung des Referenzszenarios sind die **CO_2-Emissionsnormen** für neue leichte und schwere Nutzfahrzeuge gemäß den Verordnungen [279] und [25]. Diese legen für leichte Nutzfahrzeuge eine Zielvorgabe von 0 g CO_2/km ab 2035 fest und sehen für schwere Nutzfahrzeuge eine Emissionsminderung um 90 % bis 2040 gegenüber dem Basisjahr 2020 vor. Der **CO_2-Preis** wird bis 2026 gemäß der gesetzlichen Vorgaben in [243] festgelegt und anschließend durch den europäischen Emissionshandel (EU-ETS) bestimmt. Im Szenario wird dafür angenommen, dass der Preis bis 2040 auf 200 €/t CO_2 ansteigt, gemäß [280]. Dieser gilt für fossile Kraftstoffe und wird entsprechend der heizwertbezogenen Emissionsfaktoren der Energieträger berechnet, während CO_2-neutrale Kraftstoffe (biogene und strombasierte Dieselkraftstoffe) von der Bepreisung ausgenommen sind. Als zusätzlicher Anreiz wird die **THG-Prämie** für Elektrofahrzeuge bis 2025 gemäß [281] fortgeführt. Die **Euro-7-Typgenehmigung** tritt für leichte Nutzfahrzeuge ab 2027 und für schwere Nutzfahrzeuge ab 2029 in Kraft und führt zu einer entsprechenden Anpassung der Abgasnachbehandlung der Referenzfahrzeuge in der Modellierung. Weitere fiskalische Maßnahmen zur Unterstützung des Hochlaufs alternativer Antriebe umfassen die bis 2026 geltende **Mautbefreiung** für Null-Emissionsfahrzeuge (BEV, FCEV) sowie anschließend reduzierte Mautsätze [282]. Darüber hinaus bleiben diese Fahrzeuge von der Kraftfahrzeugsteuer befreit bis 2030. Bis 2024 wird ein Investitionszuschuss von bis zu 80 % der Mehrkosten für elektrische Nutzfahrzeuge (BEV, FCEV) und deren Energieinfrastruktur (Depot-Ladeinfrastruktur) berücksichtigt [283]. Für wasserstoffbetriebene Verbrennungsmotoren werden entsprechend der geltenden Gesetzeslage keine monetären Anreize angenommen.

Die Entwicklung der **Rohöl- und Erdgasherstellungskosten** orientiert sich am „Stated Policies Scenario“ des IEA World Energy Outlook 2024 [284]. Ab 2025 wird hierbei ein weitgehend konstanter Kostenverlauf unterstellt, da in klimapolitischen Pfaden die erwarteten Nachfragerückgänge potenzielle Kostensteigerungen begrenzen. Trotz dieser Stabilisierung führt der steigende CO_2-Preis zu moderat ansteigenden Tankstellenpreisen für fossilen Diesel, CNG und LNG. Allerdings wird im Szenario, in Anlehnung an die bereits im Jahr 2024 weitgehende Belieferung von Tankstellen mit Biogas [285, 286], ab 2025 ein vollständiger Anteil von Bio-CNG und Bio-LNG unterstellt. Der **Strommix** entwickelt sich von einem Anteil erneuerbarer Energien von rund 50 % im Jahr 2020 auf 100 % im Jahr 2040. Auf Basis der in [123] dargestellten Kostenpfade wird erwartet, dass der zunehmende Anteil von PV- und Windstrom zu leicht sinkenden Stromgestehungskosten führt. Für öffentliches Laden

werden je nach Ladeleistung leistungsabhängige Betreiberentgelte berücksichtigt, wodurch sich ein moderater Kostenvorteil für Depot-Laden ergibt. Im Szenario wird angenommen, dass der **Wasserstoffmix** aufgrund der Importabhängigkeit erst ab 2045 vollständig aus grünen Quellen stammt. Wasserstoff bleibt bis 2030 von der Energiesteuer befreit und wird anschließend analog zu anderen Kraftstoffen gemäß [239] besteuert, während die Stromsteuer nach [241] berücksichtigt wird.

Der Ausbau der **Ladeinfrastruktur** erfolgt im Szenario für alle Einsatzbereiche beschleunigt. In der Marktmodellierung werden innerhalb der Gesamtkostenbewertung zunächst die Investitionskosten für erforderliche Depotladestationen berücksichtigt. Der Hochlauf der öffentlichen Schnellladeinfrastruktur, bestehend aus CCS-Ladern für leichte und mittelschwere Lkw sowie MCS-Ladern für schwere Lkw und Szm, erreicht insbesondere im Fernverkehr bis 2035 die Zielvorgaben der AFIR-Verordnung (Alternative Fuels Infrastructure Regulation) [131, 226]. Demnach ist im transeuropäischen Verkehrsnetz (TEN-T) alle 60 km ein Schnellladepunkt mit mindestens 350 kW Ladeleistung verfügbar. Parallel erfolgt der Aufbau einer **Wasserstoffinfrastruktur** mit Schwerpunkt auf 350-bar CH_2-Stationen für Fernverkehrsanwendungen, jedoch nachrangig gegenüber dem Strominfrastrukturausbau. Eine vollständige Netzdichte wird erst bis 2040 erreicht, mit einer Versorgungsabdeckung alle 200 km im Fernverkehr. Der Ausbau der CNG- und LNG-Infrastruktur stagniert ab 2025 und bleibt weitgehend konstant. Die Infrastrukturentwicklung bisher nicht etablierter Energieträger, wie flüssigem Wasserstoff (LH_2) oder erneuerbare Dieselkraftstoffen, wird erst ab 2035 mit einem moderaten Anstieg angenommen, um in der Modellierung einen frühen Hochlauf dieser Technologien bewusst zu begrenzen

Technologisch wird eine kontinuierliche Effizienzsteigerung elektrischer Antriebssysteme unterstellt, begleitet von sinkenden **Batteriekosten** gemäß den Zielwerten aus [161] sowie einer moderaten Kostendegression bei **Brennstoffzellensystemen**. Im Bereich der Automatisierung wird auf Basis der Einsatzpflicht von bestimmten Fahrerassistenzsystemen die Stufe 2 als Basiskonfiguration definiert; ab 2030 werden Stufe 3 (z. B. Platooning) und ab 2035 Stufe 4 Automatisierungskonzepte mit Anwendungen im Fernverkehr (etwa im Hub-to-Hub-Betrieb) ermöglicht. Im Stadtverkehr werden hingegen keine höheren Automatisierungsstufen und keine fahrerlosen Fahrzeuge angenommen.

Die Verkehrsprognose des Bundesverkehrsministeriums geht für den deutschen Straßengüterverkehr bis 2050 von einem Zuwachs der **Fahrleistung** um rund 53 % gegenüber 2020 aus [6]. Für die Modellierung in dieser Arbeit wird dagegen ein reduzierter Anstieg um 26 % angenommen, um den technologischen Einfluss innerhalb der Modellierung stärker in den Vordergrund zu stellen, gleichzeitig aber den grundsätzlichen Wachstumstrend des Güterverkehrs beizubehalten.

Die wesentlichen Annahmen und Rahmenbedingungen des Referenzszenarios „Direkte Elektrifizierung“ sind in Tabelle 36 zusammengefasst. Sie zeigen die zentralen technologischen, regulatorischen und ökonomischen Parameter im zeitlichen Verlauf bis 2050.

Tabelle 36: Annahmen und Rahmenbedingungen im Referenzszenario „Direkte Elektrifizierung“

	Parameter	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2050	Quelle
Markt- und Fahrleistung	Entwicklung Jährliche Neuzulassung LNF+SNF	Anzahl in Tsd.	321	350	380	380	380	380	KBA und Annahme
	Entwicklung Jährliche Gesamtfahrleistung LNF	Mrd.km	53,7	79,6	85,5	88	90,8	95,4	[287]
	Entwicklung Jährliche Gesamtfahrleistung SNF (Inländische + ausländische)	Mrd.km	45,5	57,9	62	63,5	65,5	69,1	[287]
CO2-Regulierung Neuwagen-flotte (leichte Nutzfahrzeuge)	CO2 Emissionsnorm 3,5t Transporter	gCO2/km	147 (NEDC)	153,9 (WLTP)	90,6 (WLTP)	0	0	0	[8]
	Anrechnung erneuerbarer Kraftstoffe	-	Nicht zulässig						
	CO2 Strafe je g Überschreitung	Euro gCO2/km	95	95	95	95	95	95	[8]
CO2-Regulierung Neuwagen-flotte (schwere Nutzfahrzeuge)	CO2 Emissionsnorm 7,5t Lkw	gCO2/tkm	-	-	51	32	9	9	[271] Basiswert 2020: 92 gCO2/tkm
	CO2 Emissionsnorm 12t Lkw	gCO2/tkm	-	-	54	34	10	10	Basiswert 2020: 98 gCO2/tkm
	CO2 Emissionsnorm 18t Lkw	gCO2/tkm	-	168	109	69	20	20	Basiswert 2020: 197,9 gCO2/tkm
	CO2 Emissionsnorm 26t Lkw	gCO2/tkm	-	54	35	22	6,4	6,4	Basiswert 2020: 64 gCO2/tkm
	CO2 Emissionsnorm 40t Lkw	gCO2/tkm	-	48	31	20	5,6	5,6	Basiswert 2020: 55,9 gCO2/tkm
	Anrechnung erneuerbarer Kraftstoffe	-	Nicht zulässig						
	CO2 Strafe je g Überschreitung	Euro gCO2/tkm	0	4.250	6.800	6.800	6.800	6.800	[271]
CO2-Regulierung Verkehr	CO2-Preis für fossile Kraftstoffe	Euro t. CO2	0	55	100	150	200	200	bis 2025 nach [243], ab 2027 nach [288]
	CO2 Minderungsquote für Kraftstoffmix (THG-Quote, REDIII)	Red. in %	6	10,6	25,1	39	53	100	Gesetz, annahme
CO2-Faktoren für Wasserstoff und Strom	Anteil grüner Wasserstoff	%	5	5	30	45	60	100	Annahme
	WtT-CO2-Intensität grauer H2	gCO2/MJ	109	109	84	69	54	9,5	[90]
	Anteil grüner Strom im Netz	%	50	60	80	90	100	100	Annahme
	WtT-CO2-Intensität Kohlestrom	gCO2/MJ	106	85	46	21	0	0	[90]
Kosten für Kraftstoffe und Strom	Rohöl-Gestehungskosten	Euro/l	0,54	0,5	0,47	0,46	0,46	0,46	[284]
	Methan-Gestehungskosten	Euro/kg	0,44	0,31	0,18	0,18	0,18	0,19	[284]
	XtL-Diesel Gestehungskosten	Euro/l	4,92	4,92	4,18	3,9	3,67	3,28	[104]
	H2-Gestehungskosten	Euro/kg	9,36	8,7	8,04	7,6	7,14	6,47	[104] (700 Bar H2: Aufpreis 1 Euro/kg)
	Depot-Strompreis	Euro/kWh	0,27	0,25	0,22	0,22	0,22	0,22	[103]
	Öffentlicher Ladepreis (CCS)	Euro/kWh	0,4	0,37	0,34	0,34	0,34	0,34	(MCS: 0,10 Cent/kWh Aufpreis)
Öffentliche Energie-infrastruktur (Netzdichte)	XtL-Diesel-Tankstelle	Anzahl	0 (kein Ausbau)						
	CNG-Tankstelle	Anzahl	820 (konstant)						
	LNG-Tankstelle	Anzahl	157 (konstant)						
	CH2-Tankstele 350 Bar	Anzahl	Anstieg auf 245 Stationen im Jahr 2040						
	CH2-Tankstele 700 Bar	Anzahl	Anstieg auf 220 Stationen im Jahr 2040						
	LH2-Tankstelle	Anzahl	0 (kein Ausbau)						
	CCS Ladestation	Anzahl	Anstieg auf 4.800 Stationen im Jahr 2035						
	MCS Ladestation	Anzahl	Anstieg auf 560 Stationen im Jahr 2035						
Technologie-kosten	Hochenergiebatterie		258 Euro/kWh (Startkosten), Lernrate 0,9; 58 Euro/kWh (Zielkosten)						
	Hochleistungsbatterie		366 Euro/kWh (Startkosten), Lernrate 0,9; 72 Euro/kWh (Zielkosten)						
	Brennstoffzellensystem		228 Euro/kW (Startkosten), Lernrate 0,9; 140 Euro/kW (Zielkosten)						
	Wasserstofftank (350 Bar)		873 Euro/kg (Startkosten), Lernrate 0,9; 437 Euro/kg (Zielkosten)						
	Wasserstofftank (700 Bar)		1053 Euro/kg (Startkosten); Lernrate 0,9; 453 Euro/kg (Zielkosten)						
	LiDAR (Nahbereich)		1520 Euro (Startkosten); Lernrate 0,8; 540 Euro (Zielkosten)						
	LiDAR (Fernbereich)		3500 Euro (Startkosten); Lernrate 0,8; 950 Euro (Zielkosten)						
	Zentraler Steuergerät (Stufe 2/3)		900 Euro (Startkosten); Lernrate 0,85; 450 Euro (Zielkosten)						
	Zentraler Steuergerät (Stufe 4/5)		2500 Euro (Startkosten); Lernrate 0,8; 1500 Euro (Zielkosten)						
Technologiever fügbarkeit (Einführungs-zeitpunkt)	EURO 7 Abgasnachbehandlung LNF	Jahr	Ab 2027						
	EURO 7 Abgasnachbehandlung SNF	Jahr	Ab 2029						
	XtL Dieselmotor	Jahr	Nicht Verfügbar						
	PHEV/REEV Hybrid Systeme	Jahr	2025						
	LH2 Tanksystem für FCEV	Jahr	Nicht Verfügbar						
	Stufe 2	Jahr	2022						
	Stufe 3 in Stadt- und Regionalverkehr	Jahr	Keine Zulassung						
	Stufe 3 in Fernverkehr (Autobahn)	Jahr	2030						
	Stufe 4 in Stadt- und Regionalverkehr	Jahr	Keine Zulassung						
	Stufe 4 in Fernverkehr (Autobahn)	Jahr	2035						
	Stufe 5	Jahr	Keine Zulassung						
Fiskalische Maßnahmen	Fahrzeug-Kaufbonus	Euro	-80%	0	0	0	0	0	[283, 289].
	Infrastruktur-Kaufbonus	Euro	-80%	0	0	0	0	0	[283]
	Kfz-Steuerbefreiung	-	Für BEV & FCEV bis 2030						[290]
	Maut-Befreiung für SNF	-	Für BEV & FCEV bis 2025 befreit und ab 2026 reduzierter Mautsatz						[282]
	THG-Prämie N1	Euro/Jahr	120	120	120	0	0	0	[282]
	THG-Prämie N2	Euro	824	824	824	0	0	0	[282]
	THG-Prämie N3	Euro	1.787	1.787	1.787	0	0	0	[281]
	Energiesteuer-Befreiung	-	Befreiung für CNG, LNG und H2 bis 2030, danach nach Gesetz, Stromsteuer nach BMF						nach [291] sowie [292]
Weitere Parameter	Inflation	%	2,1						Basis Deutsche Bundesbank, Abzinsungszinssätze [293]
	Zinssatz	%	5,8						[294]
	Kapitalrendite	%	30						Nach Körperschaftsteuergesetz (KStG) § 23 Steuersatz

7.1.2 Alternativszenario: Indirekte Elektrifizierung

Das Alternativszenario „Indirekte Elektrifizierung“ berücksichtigt eine verstärkte Nutzung strombasierter Energieträger in der Dekarbonisierung des Straßengüterkraftverkehrs. Es geht von einem verlangsamten Ausbau des Stromnetzes und einem eingeschränkten Zugang zu flächendeckender und leistungsfähiger Ladeinfrastruktur aus. Unter diesen Rahmenbedingungen gewinnen Energieträger der indirekten Elektrifizierung, insbesondere grüner Wasserstoff (für FCEV und H_2-Verbrennungsmotoren) sowie strombasierter Dieselkraftstoffe, an Bedeutung, da sie für eine einfachere Energiespeicherung im Fahrzeug, einen flexibleren Transport und eine teilweise Nutzung bestehender Energieinfrastruktur potentiell erscheinen.

Eine wesentliche regulatorische Rahmenbedingung im Szenario, die die Markteinführung erneuerbarer Kraftstoffe ermöglicht, ist deren Berücksichtigung in den CO_2-Flottenemissionsnormen für neue leichte und schwere Nutzfahrzeuge. Hierfür wird gemäß der in Kapitel 6 beschriebenen Methodik angenommen, dass verbrennungsmotorische Nutzfahrzeuge die ausschließlich mit erneuerbaren Kraftstoffen betrieben werden, innerhalb der **CO_2-Flottenregulierung** als Null-Emissionsfahrzeuge angerechnet werden. Darüber hinaus wird auch der Wasserstoff-Verbrennungsmotor als Null-Emissionsfahrzeug berücksichtigt.

Weitere Maßnahmen im Szenario umfassen über die **THG-Minderungsquoten** zusätzliche Anreize zur Beimischung erneuerbarer Kraftstoffe in der Bestandsflotte. Nach aktuellem Rechtsstand [260] sieht die THG-Quotenregelung bis 2040 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 53 %, wobei hier in der Szenarioanalyse bis 2050 eine vollständige Dekarbonisierung des Kraftstoffmixes fortgesetzt wird. Sollte daher die durch die Neuwagenmarktsimulation erzielte CO_2-Minderung aus dem Hochlauf emissionsarmer bzw. emissionsfreier Nutzfahrzeuge nicht ausreichen, werden innerhalb der Szenarioanalyse die erforderlichen Beimischungsmengen erneuerbare Kraftstoffe auf Basis der THG-Quotenanforderungen dynamisch in der Bestandsmodellierung ermittelt. Dabei wird angenommen, dass strombasierte Dieselkraftstoffe eine 100% Emissionseinsparung gegenüber fossilem Diesel ermöglichen. Um auch den Wasserstoff als nachhaltigen Kraftstoff in der THG-Quote anrechnen zu können, gemäß [261], wird ab 2030 ein vollständiger grüner Wasserstoffanteil aus Elektrolyse mit erneuerbarem Strom angenommen. Für Wasserstoff und Fischer-Tropsch-Diesel werden die **Kostenpfade** nach [104], die den Pfad der Elektrolyse- und FT-Synthese mittels PV-Strom aus der MENA-Region charakterisiert, und um Annahmen für Transport- und Verteilungskosten nach Deutschland ergänzt. Für strombasierte Dieselkraftstoffe bleibt der **CO_2-Preis** unverändert, da er weiterhin auf den heizwertbezogenen Emissionsfaktoren beruht. Allerdings wird für strombasierte Dieselkraftstoffe eine reduzierte **Energiesteuer** nach

[295] angenommen. Der Deckungsbeitrag für erneuerbare Kraftstoffe wird analog zu fossilen Kraftstoffen angenommen.

Neben gasförmigem Wasserstoff (CH_2) wird ab 2030 auch flüssiger Wasserstoff (LH_2) in die Versorgung integriert. Zur Unterstützung der Markteinführung bleibt Wasserstoff bis 2035 von der Energiesteuer [239] befreit. Der Anteil erneuerbarer Energien am Strommix wird im Gegensatz zum Referenzszenario erst 2045 erreicht. Die Rohöl- und Erdgasherstellungskosten folgen dem „Net Zero Emissions by 2050“ Szenario des IEA World Energy Outlook 2024 [262].

Der Ausbau der **Kraftstoffinfrastruktur** erfolgt ab 2030 mit einer raschen Erweiterung bestehender Dieseltankstellen auf XtL-Kraftstoffe, wodurch eine vollständige Verfügbarkeit für alle Einsatzbereiche von Nutzfahrzeugen angenommen wird. Die CNG- und LNG-Infrastruktur bleiben dagegen konstant. Der Ausbau der **Ladeinfrastruktur** verläuft im Vergleich zum Referenzszenario verlangsamt: Öffentliche Ladepunkte basieren ausschließlich auf CCS-Standard und ein flächendeckend Zugang nach AFIR Zielsetzung ist erst im Jahr 2040 verfügbar. MCS Stationen für die schweren Nutzfahrzeuge wird nicht fokussiert im Alternativszenario „indirekte Elektrifizierung“. Stattdessen erfolgt ein verstärkter Ausbau der **Wasserstoffinfrastruktur**, mit 700 bar-Stationen für leichte und 350 bar-Stationen für schwere Nutzfahrzeuge, sowie ab 2030 die Ergänzung der H2-Tankstellen mit LH_2-Stationen. Aufgrund der zunehmenden Netzabdeckung werden geringere Infrastrukturmargen unterstellt, die zu einem insgesamt geringen Wasserstofftankstellenpreis resultieren als im Referenzszenario.

Technologisch wird weiterhin eine kontinuierliche Effizienzsteigerung elektrischer Antriebssysteme unterstellt, wobei für Brennstoffzellen- und Wasserstofftanksysteme eine höhere Kostendegression als im Referenzszenario angenommen wird. Die Rahmenbedingungen für Automatisierungstechnologien entsprechen jenen des Referenzszenarios. Damit sind autonome Anwendungen außerhalb von Autobahnen nicht vorgesehen. Stufe 4 bleibt auf Fernverkehrsanwendungen beschränkt, während Stufe 5 im betrachteten Zeitraum nicht angenommen wird.

Die Tabelle 37 fasst die Annahmen und Rahmenbedingungen des Alternativszenarios „Indirekte Elektrifizierung“ zusammen. Dargestellt sind die maßgeblichen Entwicklungen der energiepolitischen, regulatorischen und technologischen Parameter über den Betrachtungszeitraum bis 2050.

Tabelle 37: Annahmen und Rahmenbedingungen im Alternativszenario „indirekte Elektrifizierung“

	Parameter	Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2050	Quelle
Markt- und Fahrleistung			Siehe Referenzszenario						
CO2-Regulierung Neuwagen-flotte (leichte Nutzfahrzeuge)	CO2 Emissionsnorm 3,5t Transporter	gCO2/km	147 (NEDC)	153,9 (WLTP)	90,6 (WLTP)	0	0	0	[8]
	Anrechnung erneuerbarer Kraftstoffe	-	ab 2030 zulässig						
	CO2 Strafe je g Überschreitung	Euro gCO2/km	95	95	95	95	95	95	[8]
CO2-Regulierung Neuwagen-flotte (schwere Nutzfahrzeuge)	CO2 Emissionsnorm 7,5t Lkw	gCO2/tkm	-	-	51	32	9	9	[271] Basiswert 2020: 92 gCO2/tkm
	CO2 Emissionsnorm 12t Lkw	gCO2/tkm	-	-	54	34	10	10	Basiswert 2020: 98 gCO2/tkm
	CO2 Emissionsnorm 18t Lkw	gCO2/tkm	-	168	109	69	20	20	Basiswert 2020: 197,9 gCO2/tkm
	CO2 Emissionsnorm 26t Lkw	gCO2/tkm	-	54	35	22	6,4	6,4	Basiswert 2020: 64 gCO2/tkm
	CO2 Emissionsnorm 40t Lkw	gCO2/tkm	-	48	31	20	5,6	5,6	Basiswert 2020: 55,9 gCO2/tkm
	Anrechnung erneuerbarer Kraftstoffe	-	ab 2035 zulässig						
	CO2 Strafe je g Überschreitung	Euro gCO2/tkm	0	4.250	6.800	6.800	6.800	6.800	[271]
CO2-Regulierung Verkehr	CO2-Preis für fossile Kraftstoffe	Euro t. CO2	0	55	100	200	300	300	bis 2025 nach [243], ab 2027 nach [288]
	CO2 Minderungsquote für Kraftstoffmix (THG-Quote, REDIII)	Red. in %	6	10,6	25,1	39	53	100	Gesetz, Annahme
CO2-Faktoren für Wasserstoff und Strom	Anteil grüner Wasserstoff	%	5	10	100	100	100	100	Annahme
	WtT-CO2-Intensität grauer H2	gCO2/MJ	109,4	100	0	0	0	0	[90]
	Anteil grüner Strom im Netz	%	50	60	80	90	95	100	Annahme
	WtT-CO2-Intensität Kohlestrom	gCO2/MJ	106,3	97,9	72	62	52,7	0	[90]
Kosten für Kraftstoffe und Strom	Rohöl-Gestehungskosten	Euro/l	0,54	0,5	0,47	0,46	0,46	0,46	[284]
	Methan-Gestehungskosten	Euro/kg	0,44	0,31	0,18	0,18	0,18	0,19	[284]
	XtL-Diesel Gestehungskosten	Euro/l	4,92	4,92	2,30	2,18	2,05	1,85	[104]
	H2-Gestehungskosten	Euro/kg	9,36	9,36	5,1	4,85	4,64	4,22	[104]
	Deport-Strompreis	Euro/kWh	0,27	0,25	0,22	0,22	0,22	0,22	[103]
	Öffentlicher Ladepreis (CCS)	Euro/kWh	0,4	0,37	0,34	0,34	0,34	0,34	(MCS: 0,10 Cent/kWh Aufpreis)
Öffentliche Energie-infrastruktur (Netzdichte)	XtL-Diesel-Tankstelle	Anzahl	Anstieg auf 7.100 Stationen im Jahr 2035 (bestehende Dieseltankstellen)						
	CNG-Tankstelle	Anzahl	820 (konstant)						
	LNG-Tankstelle	Anzahl	157 (konstant)						
	CH2-Tankstele 350 Bar	Anzahl	Anstieg auf 695 Stationen im Jahr 2035						
	CH2-Tankstele 700 Bar	Anzahl	Anstieg auf 460 Stationen im Jahr 2035						
	LH2-Tankstelle	Anzahl	Anstieg auf 176 Stationen im Jahr 2040						
	CCS Ladestation	Anzahl	Anstieg auf 2.300 Stationen im Jahr 2040						
	MCS Ladestation	Anzahl	0 (kein Ausbau)						
Technologie-kosten	Hochenergiebatterie		258 Euro/kWh (Startkosten), Lernrate 0,9; 58 Euro/kWh (Zielkosten)						
	Hochleistungsbatterie		366 Euro/kWh (Startkosten), Lernrate 0,9; 72 Euro/kWh (Zielkosten)						
	Brennstoffzellensystem		228 Euro/kW (Startkosten), Lernrate 0,9; 140 Euro/kW (Zielkosten)						
	Wasserstofftank (350 Bar)		873 Euro/kg (Startkosten), Lernrate 0,85; 437 Euro/kg (Zielkosten)						
	Wasserstofftank (700 Bar)		1053 Euro/kg (Startkosten); Lernrate 0,85; 453 Euro/kg (Zielkosten)						
	LiDAR (Nahbereich)		1520 Euro (Startkosten); Lernrate 0,8; 540 Euro (Zielkosten)						
	LiDAR (Fernbereich)		3500 Euro (Startkosten); Lernrate 0,8; 950 Euro (Zielkosten)						
	Zentraler Steuergerät (Stufe 2/3)		900 Euro (Startkosten); Lernrate 0,85; 450 Euro (Zielkosten)						
	Zentraler Steuergerät (Stufe 4/5)		2500 Euro (Startkosten); Lernrate 0,8; 1500 Euro (Zielkosten)						
Technologiever fügbarkeit (Einführungs-zeitpunkt)	EURO 7 Abgasnachbehandlung LNF	Jahr	Ab 2027						
	EURO 7 Abgasnachbehandlung SNF	Jahr	Ab 2029						
	XtL Dieselmotor	Jahr	Ab 2030						
	PHEV/REEV Hybrid Systeme	Jahr	2025						
	LH2 Tanksystem für FCEV	Jahr	2030						
	Stufe 2	Jahr	2022						
	Stufe 3 in Stadt- und Regionalver.	Jahr	Keine Zulassung						
	Stufe 3 in Fernverkehr (Autobahn)	Jahr	2030						
	Stufe 4 in Stadt- und Regionalverkehr	Jahr	Keine Zulassung						
	Stufe 4 in Fernverkehr (Autobahn)	Jahr	2035						
	Stufe 5	Jahr	Keine Zulassung						
Fiskalische Maßnahmen	Fahrzeug-Kaufbonus	Euro	Siehe Referenzszenario						
	Infrastruktur-Kaufbonus	Euro	Siehe Referenzszenario						
	Kfz-Steuerbefreiung	-	Siehe Referenzszenario						
	Maut-Befreiung für SNF	-	Siehe Referenzszenario						
	THG-Prämie N1	Euro/Jahr	Siehe Referenzszenario						
	THG-Prämie N2	Euro	Siehe Referenzszenario						
	THG-Prämie N3	Euro	Siehe Referenzszenario						
	Energiesteuer-Befreiung	-	Befreiung für CNG, LNG und H2 bis 2030, danach nach Gesetz, Stromsteuer nach BMF						nach [291] sowie [292]
Weitere Parameter			Siehe Referenzszenario						

7.1.3 Alternativszenario: Automatisierung

Das zweite Alternativszenario, das „Automatisierungsszenario“, baut auf den wesentlichen Annahmen im Referenzszenario auf und beschreibt einen progressiven technologischen Entwicklungspfad für Automatisierungstechnologien im Straßengüterkraftverkehr. Es geht von einer beschleunigten technologischen Reife, einer frühzeitigen regulatorischen Freigabe sowie der Klärung haftungsrechtlicher Fragen aus, wodurch höhere Automatisierungsgrade insbesondere im Fern- und Regionalverkehr früher marktreif werden. Während in den Dekarbonisierungsszenarien die Automatisierung auf Stufen 2 bis 4 (im Fernbereich) begrenzt bleibt, werden im Automatisierungsszenario alle Automatisierungsstufen bis Stufe 5, einschließlich fahrerloser 40t Szm (siehe auch Kapitel 3.1), berücksichtigt. Wesentliche technologische Rahmenbedingungen sind eine schnellere Kostendegression der relevanten Automatisierungskomponenten sowie die Möglichkeit, über eine höhere Marktdurchdringung autonomer und vernetzter Nutzfahrzeuge auch auf Verkehrsebene Effizienzsteigerungen abzubilden (sogenannte sekundäre Effekte) und damit den Einfluss auf den Endenergieverbrauch modellseitig zu berücksichtigen.

In der CO2-Flottenregulierung werden keine grundlegenden Anpassungen über die im Referenzszenario erläuterten Annahmen hinaus vorgenommen. Dadurch bleibt die Vergleichbarkeit zu den anderen Szenarien gewahrt, da auch hier die bestehenden politischen Ansätze zur Dekarbonisierung als Ausgangspunkt dienen. Das Szenario bewertet damit unter der Annahme einer zunehmenden Technologiereifegrad die Reaktion von Fahrzeugnutzern (Simulationsagenten) auf Automatisierungskonzepte innerhalb der Kaufmodellierung. Berücksichtigt werden dabei die spezifische **Betriebskostenstrukturen** für automatisierungsgradspezifische Nutzfahrzeugkonzepten, wie automatisierungsgradspezifische **Effizienzpotentiale**, Annahmen zu Versicherungskosten und Fahrpersonalkosten sowie zeitliche Vorteile durch erhöhte Fahrzeugauslastung, die die wirtschaftliche Attraktivität automatisierter Fahrzeugkonzepte maßgeblich beeinflussen. Tabelle 38 fasst die Annahmen und Rahmenbedingungen des Automatisierungsszenarios zusammen.

Tabelle 38: Annahmen und Rahmenbedingungen im Alternativszenario „Automatisierung“

Parameter		Einheit	2020	2025	2030	2035	2040	2050	Quelle
Markt- und Fahrleistung			Siehe Referenzszenario						
CO2-Regulierung Neuwagen-flotte (leichte Nutzfahrzeuge)			Siehe Referenzszenario						
CO2-Regulierung Neuwagen-flotte (schwere Nutzfahrzeuge)			Siehe Referenzszenario						
CO2-Regulierung Verkehr			Siehe Referenzszenario						
CO2-Faktoren für Wasserstoff und Strom			Siehe Referenzszenario						
Kosten für Kraftstoffe und Strom			Siehe Referenzszenario						
Öffentliche Energie-infrastruktur (Netzdichte)			Siehe Referenzszenario						
Technologie-kosten	Hochenergiebatterie		258 Euro/kWh (Startkosten), Lernrate 0,9; 58 Euro/kWh (Zielkosten)						
	Hochleistungsbatterie		366 Euro/kWh (Startkosten), Lernrate 0,9; 72 Euro/kWh (Zielkosten)						
	Brennstoffzellensystem		228 Euro/kW (Startkosten), Lernrate 0,9; 140 Euro/kW (Zielkosten)						
	Wasserstofftank (350 Bar)		873 Euro/kg (Startkosten), Lernrate 0,85; 437 Euro/kg (Zielkosten)						
	Wasserstofftank (700 Bar)		1053 Euro/kg (Startkosten); Lernrate 0,85; 453 Euro/kg (Zielkosten)						
	LiDAR (Nahbereich)		1520 Euro (Startkosten); Lernrate 0,75; 540 Euro (Zielkosten)						
	LiDAR (Fernbereich)		3500 Euro (Startkosten); Lernrate 0,75; 950 Euro (Zielkosten)						
	Zentraler Steuergerät (Stufe 2/3)		900 Euro (Startkosten); Lernrate 0,8; 450 Euro (Zielkosten)						
	Zentraler Steuergerät (Stufe 4/5)		2500 Euro (Startkosten); Lernrate 0,75; 1500 Euro (Zielkosten)						
Technologie-verfügbarkeit (Einführungs-zeitpunkt)	EURO 7 Abgasnachbehandlung LNF	Jahr	Ab 2027						
	EURO 7 Abgasnachbehandlung SNF	Jahr	Ab 2029						
	XtL Dieselmotor	Jahr	Ab 2030						
	PHEV/REEV Hybrid Systeme	Jahr	Ab 2025						
	LH2 Tanksystem für FCEV	Jahr	Ab 2030						
	Stufe 2	Jahr	Ab 2022						
	Stufe 3 in Stadt- und Regionalver.	Jahr	Ab 2028						
	Stufe 3 in Fernverkehr (Autobahn)	Jahr	Ab 2025						
	Stufe 4 in Stadt- und Regionalverkehr	Jahr	Ab 2035						
	Stufe 4 in Fernverkehr (Autobahn)	Jahr	2030						
	Stufe 5	Jahr	Ab 2040						
Entwicklung der Effizienzpotential in Abhängigkeit der Durchdringungsrate (DR)	Stufe 3 in Stadt- und Regionalver.		Geringe DR: -0%; Mittlere DR: -3%; Hohe DR: -5%						
	Stufe 3 in Fernverkehr (Autobahn)		Geringe DR: -0%; Mittlere DR: -2%; Hohe DR: -7%						
	Stufe 4 in Stadt- und Regionalverkehr Stufe 5		Geringe DR: -0%; Mittlere DR: -3%; Hohe DR: -10%						
	Stufe 4 in Fernverkehr (Autobahn)		Geringe DR: -0%; Mittlere DR: -3%; Hohe DR: -7%						
Bewertung des Sicherheits-potentiale je Automatisierungs-stufe	Stufe 5		10-16% (je Segment)						
	Stufe 3 in Stadt- und Regionalver.		10%						
	Stufe 3 in Fernverkehr (Autobahn)		25%						
	Stufe 4 in Stadt- und Regionalverkehr		25%						
	Stufe 4 in Fernverkehr (Autobahn)		19-26% (je Segment)						
	Stufe 5		24-32% (je Segment)						
Fiskalische Maßnahmen			Siehe Referenzszenario						
Weitere Parameter			Siehe Referenzszenario						

7.2 Auswertung der technologischen Marktpotenziale und Bestandsentwicklungen

Die in den vorangegangenen Kapitel definierten Szenarien werden im Folgenden hinsichtlich ihrer technologischen Marktpotenziale und der Entwicklung des Nutzfahrzeugbestands analysiert. Grundlage bilden das agentenbasierte Fahrzeugmarktmodell und das dynamische Bestandsmodell. Im Fokus steht hierbei die zeitliche Dynamik der Marktadoption und -diffusion von antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifischen Nutzfahrzeugkonzepten im deutschen Straßengüterverkehr bis 2050.

7.2.1 Referenzszenario: Direkte Elektrifizierung

Abbildung 33 zeigt die Entwicklung der Modellergebnisse nach Neuzulassungsanteilen konkurrierender Antriebsstrangkonzepte sowie Automatisierungsstufen für leichte (bis 3,5t Transporter) und schwere Nutzfahrzeuge (7,5t bis 26t Lkw sowie 40t Szm) im Referenzszenario. In der Legende dieser und folgenden Abbildungen werden nur die durchgesetzten Antriebsstrang- und Automatisierungskonzepte aufgeführt.

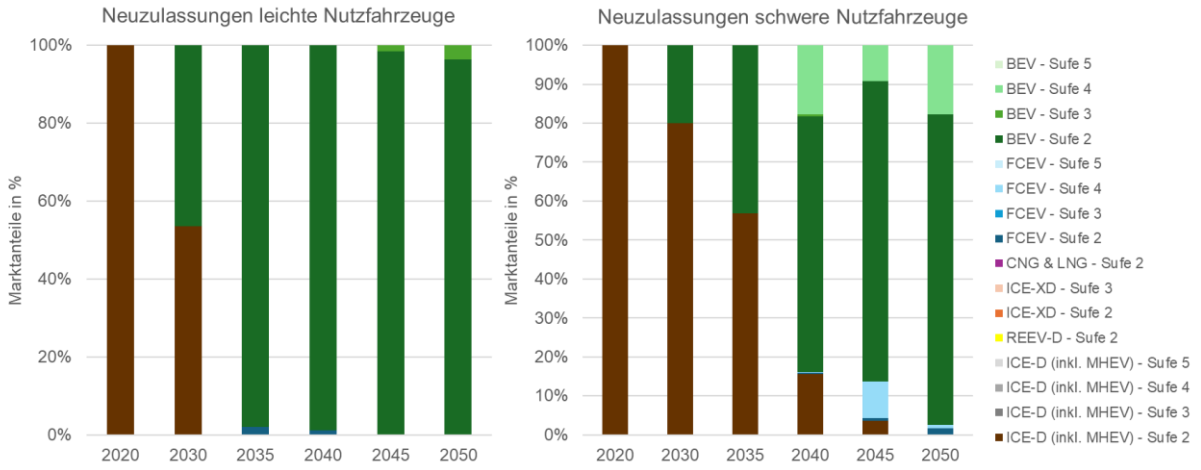


Abbildung 33: Entwicklung der simulierten Neuzulassungen-Marktanteile für leichte (linke Abbildung) und schwere (rechte Abbildung) Nutzfahrzeuge im Referenzszenario direkte Elektrifizierung

Im Segment der leichten Nutzfahrzeuge (LNF) setzt der Markteintritt von batterie-elektrischen Konzepten (BEV, Stufe 2) ab 2021 zunächst bei Agenten im Gütertransport im Nahbereich mit Depot-Ladelösung ein. Die sinkenden Herstellungskosten der Hochenergiebatteriesysteme innerhalb der Simulation gehen auf die steigende Nachfrage weitere Käufergruppen (Agenten) und den technologischen Annahmen für die Antriebsstrangkomponente zurück. Die dadurch resultierenden Fahrzeugreichweiten der BEVs erfüllen die täglichen Streckenanforderungen der Simulationsagenten. Ab dem Simulationsjahr 2030 erreicht das öffentliche Schnellladenetz mit 150 kW Ladeleistung eine Netzdichte von unter 100 km im Szenario, wodurch auch zeitliche Anforderungen für Agenten im Regional- und Fernverkehr nicht mehr einschränkend auf die Kaufentscheidung wirken. Unter den gegebenen Rahmenbedingungen entscheiden sich die Agenten in der ökonomischen und einsatzspezifischen Bewertung zunehmend für BEV-Konzepte. Hybridantriebskonzepte können sich im Vergleich nicht durchsetzen.

Parallel dazu führt die verschärfte CO_2-Flottenregulierung bis 2035 in Verbindung mit der Einführung der EURO 7 Norm ab 2027 zu einem deutlichen Marktrückgang konventioneller Dieselkonzepte. Innerhalb der Simulation wird dies über die Übertragung möglicher Strafzahlungen (im Kontext der CO2-Flottenregulierung) auf die Kundenagenten abgebildet. Ab 2030 setzen sich im Nahverkehr Mildhybride (MHEV, Stufe 2) mit einem Marktanteil von rund 65 % innerhalb der Technologiegruppe „ICE-D (inkl. MHEV) Stufe 2“ durch. Für Agenten mit täglichen Fahrstrecken über 690 km, hauptsächlich im Regional- und Fernverkehr, zeigen sich ab 2035 Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV, Stufe 2) als vorteilhaft, da unter den Szenarioannahmen eine moderate Ausbaudichte der Wasserstoffinfrastruktur (700 bar) unterstellt wird. Diese Marktanteile tragen zur Erreichung des CO_2-Flottenziels von 0 g CO_2/km im Jahr 2035 bei. Ab 2045 setzen sich im Modell BEV-Konzepte mit

bedingte Automatisierung (Stufe 3, z.B. als Autobahnpilot) bei Agenten mit Jahresfahrleistungen über 50.000 km durch, da die hiermit verbundenen Einsparpotenziale die zusätzlichen Investitionskosten überkompensieren.

Im Segment der schweren Nutzfahrzeuge (SNF) vollzieht sich der Technologiewechsel zeitlich verzögert gegenüber des LNF, jedoch mit einem heterogeneren Technologieportfolio. Unter den Annahmen des Referenzszenarios „direkte Elektrifizierung“ erfolgt der Markteintritt von BEV (Stufe 2) im Jahr 2025, um die erstmals geltenden CO_2-Reduktionsziele (–15 % bis 2025 gegenüber 2020) zu erfüllen. Eine Mild- oder Vollhybridisierung setzt in den SNF-Segmenten nicht durch, da die zusätzlichen Komponentenkosten die begrenzten Einsparpotenziale durch Rekuperation und Start-Stopp-Systeme übersteigen. Dies zeigen auch Diesel-Nutzfahrzeugkonfigurationen in der Neuzulassungsstatistiken im Jahr 2023, da „Eco-Roll mit Start-Stopp-Funktion“ keinen Marktanteil verzeichnen [276]. PHEV- und REEV-Konzepte bieten zwar eine höhere Flexibilität durch hohe elektrische Fahranteile, sind aber aufgrund höherer berechneter Investitionskosten für Traktionsbatterien im Referenzszenario nicht wirtschaftlich gegenüber reinen BEV. Allerdings ist zu erwähnen, dass die Sensitivitätsanalyse in Kapitel 6.4 bei veränderter Infrastrukturverfügbarkeit Marktpotenziale für REEV unter spezifischen Rahmenbedingungen abbildet.

Unter Berücksichtigung von Nutzlast- und Volumenanforderungen erreichen die BEV-Konzepte im schweren Nutzfahrzeugsegment Fahrzeugreichweiten zwischen 390 und 470 km (bezogen auf die nutzbare Batteriekapazität). Bei einer Depot-Ladung mit 100 kW Schnellladeleistung ist keine Zwischenladung erforderlich, wodurch die zeitlichen Einsatzanforderungen innerhalb der Simulation erfüllt werden. Die höhere Energieeffizienz des elektrischen Antriebsstrangs (40 t Szm: ICE-D 9,7 MJ/km, BEV 4,2 MJ/km, damit ca. 55 % effizienter) in Verbindung mit günstigeren Depotstromkosten (0,27 €/kWh im Jahr 2025) führt zu Vorteilen in der Gesamtbetriebskostenrechnung. Zudem tragen Maut- und Kfz-Steuerbefreiungen sowie die THG-Prämie innerhalb der Gesamtbetriebskostenrechnung der Agenten zu einen Marktanreiz von BEV. Nach der Restwertmethode (Kapitel 5.4) erreichen SNF auch mit großen Batteriekapazitäten einen höheren Restwert, was sich ebenfalls vorteilhaft auf die Bewertung auswirkt.

Ab 2030 dominieren im Referenzszenario BEV-Konzepte auch im N2-Segment (7,5 t und 12 t Lkw), da sinkende Herstellungskosten für Batteriesysteme und elektrische Antriebseinheiten (Elektromotor mit Leistungselektronik) ihre Einsatzfähigkeit erhöhen. Ab 2035 wird eine Netzdichte öffentlicher Hochleistungsladepunkte (MCS) von unter 100 km angenommen, was eine flächendeckende Einsatzfähigkeit auch im Fernverkehr ermöglicht. Je nach Batteriekapazität ergibt sich ein Lademix von 50 bis 100 % Depotladung und entsprechend anteiligem Schnell- oder Hochleistungsladen

während der täglichen Transportaufgaben. Ab 2037 dominieren BEV-Konzepte den Neufahrzeugmarkt im schweren Nutzfahrzeugsegment in allen Einsatzbereich.

Bedingte Automatisierung der Stufe 3 werden ab 2030 modellseitig im Gütertransport im Fernbereich unterstellt, setzen sich jedoch nicht durch, da die Einsparpotenziale (moderater Wertannahme im Szenario von ca. 3%) die Mehrkosten nicht kompensieren. Erst mit der Einführung der Automatisierungsstufe 4 ab 2035 zeigen BEV eine Marktadoption von 18 % in den Neuzulassungen schwerer Fahrzeuge (18 t Lkw, 26 t Lkw und 40 t Szm). Diese Fahrzeuge profitieren von höherer unterstellten Energieeinsparungspotentialen und niedrigeren Betriebskosten, wie hinsichtlich der Versicherungskosten. Im gleichen Zeitraum erreichen FCEV (Stufe 2) geringe Marktanteile bis 1,5 % (entspricht ca. unter 2.000 Neuzulassungen pro Jahr), hauptsächlich bedingt durch angenommener hohen Systemkosten der Brennstoffzellen- und Wasserstofftanksystem sowie dem sinkenden Wasserstoffpreis. Erst in Kombination mit Automatisierungsstufe 4 ergeben sich Vorteile in den Betriebskosten, sodass sich FCEV im Fernverkehr etablieren, mit 19 % Marktanteil im Jahr 2045. Durch weitere technologische Kostensenkungen bei BEV-Konzepten verschieben sich im Modell die Anteile der FCEV (Stufe 4) wiederum schrittweise zugunsten der BEV (Stufe 4). Aufgrund der im Jahr 2050 nur noch geringen Kostenunterschiede zwischen beiden Technologien zeigt sich in diesem Zusammenhang eine hohe Sensitivität der Marktergebnisse, da bereits geringe Änderungen der zugrundeliegenden Kostenannahmen zu einer deutlichen Verschiebung der Technologieanteile führen können.

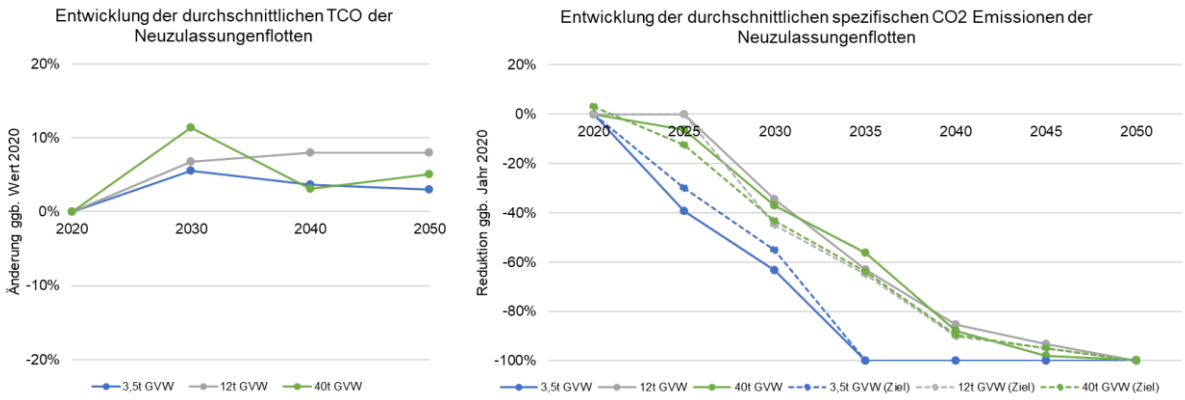


Abbildung 34: Entwicklung der durchschnittlichen Gesamtbetriebskosten (TCO) und spezifischen CO2-Emissionen der Neuzulassungsflotten im Referenzszenario direkte Elektrifizierung

Die relative Entwicklung der durchschnittlichen Gesamtbetriebskosten (TCO) für ausgewählte Nutzfahrzeugsegmente im Referenzszenario „direkte Elektrifizierung“ ist in Abbildung 34 dargestellt. Sie verdeutlicht zunächst den Anstieg der Kosten bis 2030 um bis zu 12 % gegenüber dem durchschnittlichen Niveau des Jahres 2020. Ursache hierfür ist der Markteintritt kostenintensiver batterieelektrischer Nutzfahrzeuge, die vor

allem zur Erreichung der CO_2-Zielvorgaben in den Markt gelangen, gleichzeitig jedoch, auch bedingt durch steigende Kosten der konventionellen Referenzfahrzeuge, das allgemeine Kostenniveau anheben. Langfristig flacht der Kostenanstieg insbesondere bei leichten und mittelschweren Nutzfahrzeugen ab, während im schweren Nutzfahrzeugsegment die Elektrifizierung zunehmend ökonomische Potenziale aufzeigt. Diese resultieren aus der höheren Effizienz und Leistungsfähigkeit der elektrischen Antriebsstrangkomponenten. Insgesamt zeigen die berechneten Fahrzeugbetriebskosten im Referenzszenario langfristig ein moderat erhöhtes Kostenniveau zwischen etwa +4 % und +9 % im Vergleich zum Basisjahr 2020.

Die rechte Darstellung in Abbildung 34 zeigt ergänzend die relative Entwicklung der durchschnittlichen spezifischen CO_2-Emissionen der Neuzulassungsflotten für ausgewählte Nutzfahrzeugsegmente im Vergleich zu den hinterlegten CO_2-Flottengrenzwerten. Auffällig ist, dass leichte Nutzfahrzeuge innerhalb der Simulation die Grenzwerte unterschreiten und somit schneller Emissionsminderungen erzielen als gefordert. Dies ist auf die stärkere Kostendegression und schnellere Marktakzeptanz im großen Marktsegment der leichten Nutzfahrzeuge zurückzuführen, wodurch bestehende Markthemmnisse früher überwunden werden. In den mittel- und schweren Nutzfahrzeugsegmenten hingegen werden die Zielwerte leicht verfehlt, was die modellseitig abgebildete, langsamere Marktdurchsetzung der Elektrifizierung in diesen Segmenten widerspiegelt.

Die resultierende Marktdiffusion der Technologien spiegelt sich in der Bestandsentwicklung leichter und schwerer Nutzfahrzeuge in Abbildung 35 wider. Trotz der zunehmenden Elektrifizierung im Neuwagenmarkt verbleibt ein Anteil konventioneller Dieselfahrzeuge über den gesamten Zeitraum im Bestand. Aufgrund der höheren Flottenerneuerungsrate schwerer Nutzfahrzeuge, entsprechend den fahrleistungs- und altersabhängigen Verbleibekurven in Abbildung 25, erfolgt die Bestandsanpassung dieser zwar schneller als bei leichten Nutzfahrzeugen. Im Gesamtmarkt zeigt sich dieser Effekt jedoch nicht dominierend, da das 3,5 t Transporter Segment mit einem Anteil von rund 75 % das Marktvolumen prägt. Erst ab 2035 beginnt eine merklich beschleunigte Flottenumstellung, die bis 2050 zu einer weitgehend elektrifizierten Bestandsflotte führt

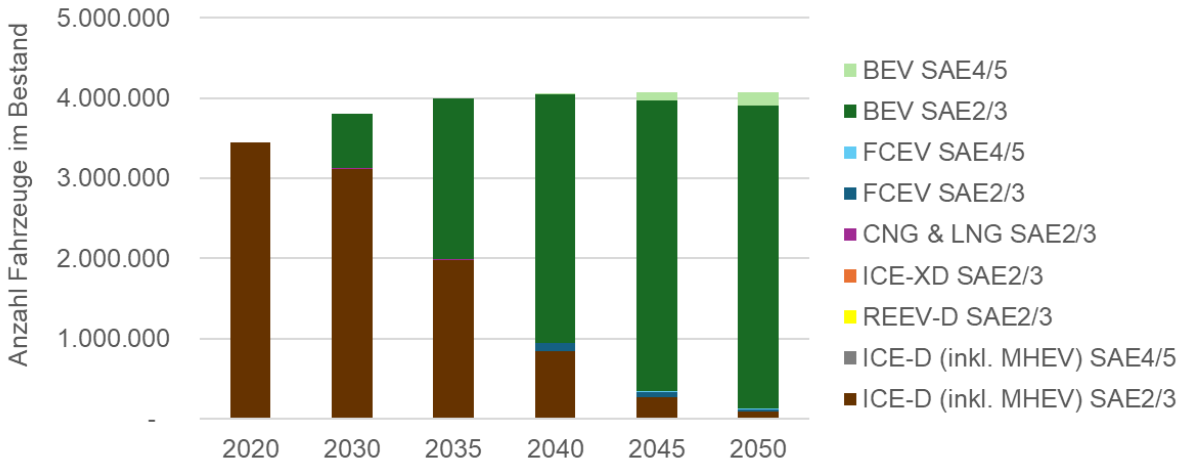


Abbildung 35: Entwicklung der simulierten Bestands-Marktanteile für leichte und schwere Nutzfahrzeuge im Referenzszenario direkte Elektrifizierung

7.2.2 Alternativszenario: Indirekte Elektrifizierung

Abbildung 36 zeigt die Entwicklung der simulierten Neuzulassungsanteile für leichte und schwere Nutzfahrzeuge im Alternativszenario „Indirekte Elektrifizierung“. Bei den leichten Nutzfahrzeugen bleibt der batterieelektrische Antrieb (BEV) trotz der angenommenen Marktbarrieren die dominierende Technologie langfristig. Ab 2030 steigt der Marktanteil BEV Stufe 2 deutlich an, da im Nah- und Regionalverkehr trotz unterstellter moderater technologischer Fortschritte bei der Komponente Hochenergiespeicher ein zunehmender Markthochlauf erfolgt. Dies führt zu einer kontinuierlichen Kostendegression der Batteriesystems. Dabei erweist sich eine Batteriekapazität von bis zu 125 kWh (etwa 450 km elektrische Reichweite) in Kombination mit Depotladeinfrastruktur als optimaler Kombination zwischen Einsatzfähigkeit und Wirtschaftlichkeit. Ab 2031 wird die Anrechenbarkeit erneuerbarer Kraftstoffe (hier FT-Diesel) innerhalb der CO_2-Flottenregulierung unterstellt. Für Transportaufgaben mit höheren Tagesreichweiten entscheiden sich die Simulationsagenten zunehmend für ICE-XD Konzepte (Dieselmotorische Antriebsstrang die mit erneuerbaren Dieselkraftstoffen betrieben werden). Aufgrund des begrenzten Ausbaus öffentlicher Schnellladeinfrastruktur werden ICE-XD im Fernverkehr als einsatzfähiger bewertet. Unter Berücksichtigung einer angenommenen Energiesteuerbegünstigung und ohne zusätzliche Investitionskosten für den Antriebsstrang stellen ICE-XD Konzepte damit und im begrenzten Zeitraum für diese Nutzergruppe eine wirtschaftlich attraktive Option dar. Dabei führt die vergleichsweise geringe jährliche Fahrleistung dazu, dass steigende Kraftstoffpreise nur einen begrenzten Einfluss auf die Gesamtbetriebskosten haben, während die Investitionskosten in der Entscheidungsfindung der Akteure stärker ins Gewicht fallen. Entsprechend erreichen ICE-XD-Fahrzeuge (Stufe 2) im Jahr 2035 einen Marktanteil von rund 9 % an den Neuzulassungen leichter Nutzfahrzeuge.

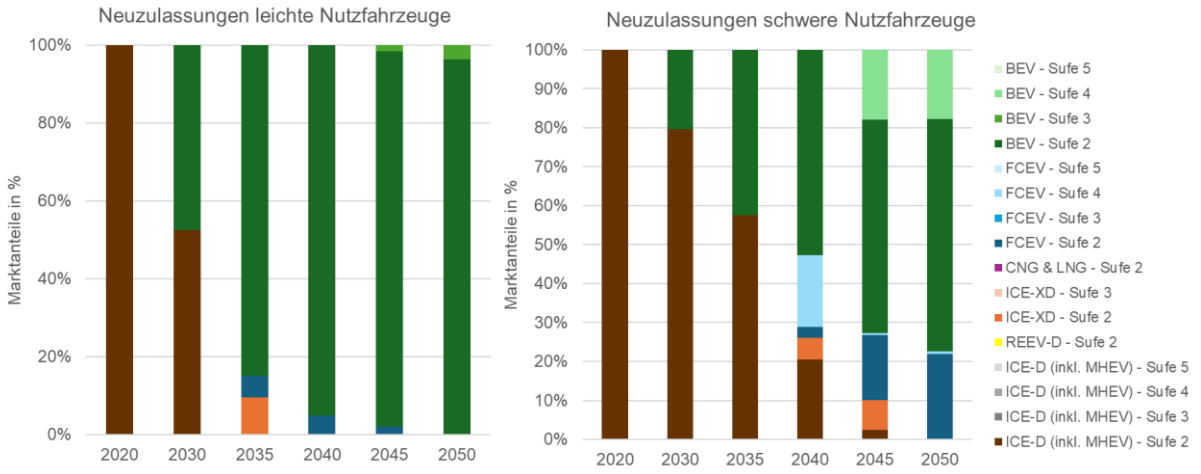


Abbildung 36: Entwicklung der simulierten Neuzulassungen-Marktanteile für leichte (linke Abbildung) und schwere (rechte Abbildung) Nutzfahrzeuge im Alternativszenario indirekte Elektrifizierung

Parallel dazu gewinnen Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEV, Stufe 2) etwa 5 % Marktanteil, was auf Effizienzsteigerungen, Kostendegression der Brennstoffzellensysteme und die zunehmende Verfügbarkeit öffentlicher Wasserstofftankstellen im Fernverkehr zurückzuführen ist. Langfristig bis 2050 etabliert sich jedoch, trotz der alternativen Kraftstoffpfade, die batterieelektrische Technologie auch im Alternativszenario als dominierende Antriebslösung. Damit fungieren sowohl FT-Diesel als auch Wasserstoff im Alternativszenario als Übergangstechnologien für den LNF-Markt, insbesondere für Fahrzeuge mit hohem Energiebedarf und eingeschränkten Ladeoptionen. Die Automatisierungskonfigurationen zeigen vergleichbare Potenziale wie im Referenzszenario, sodass für Stufe 3 keine wesentlichen Marktverschiebungen sich verdeutlichen.

Im Segment der schweren Nutzfahrzeuge zeigen sich stärkere Verschiebungen im Antriebs- und Automatisierungskonfigurationen im Alternativszenario „indirekte Elektrifizierung“. Während Dieselantriebe bis 2030 die Neuzulassungen dominieren, setzen sich ab 2035 zunehmend ICE-XD Konzepte durch. CNG- und LNG-Fahrzeuge erreichen nur zu Beginn der 2020er-Jahre geringe Marktanteile, bedingt durch begrenzte ökonomische Anreize (z. B. temporäre Mautbefreiung, vgl. Kapitel 6.5). Ab 2025 verlieren diese aufgrund der zunehmenden Kosteneffizienz elektrifizierter Antriebe vollständig an Marktpotenzial unter den Szenarioannahmen. Mit der ab 2036 angenommenen Anrechenbarkeit von ICE-XD innerhalb der CO_2-Flottenregulierung steigt der Marktanteil von ICE-XD bis 2040 auf rund 7 %. Ein günstiger Kostenpfad für synthetischen Diesel (FT-Diesel) und steuerliche Begünstigungen führen dazu, dass diese Antriebe vor allem im Fernverkehr ein relevantes Marktsegment bedienen. Ein

größerer Teil der Akteure mit Transportaufgaben im Regional- und Fernverkehr entscheidet sich jedoch für FCEV der Stufe 4, die bis 2040 einen Marktanteil von rund 18 % erreichen. Besonders auffällig ist hierbei die Verschiebung der Automatisierungskonfiguration: Die im Referenzszenario im Fernverkehr für BEV (Stufe 4) entscheidenden Akteure wählen nun FCEV (Stufe 4), begünstigt durch den günstigeren Wasserstoffkostenpfad und die unterstellten Energieeinsparpotenziale automatisierter Fahrstrategien der Stufe 4. Erst ab 2045 gewinnen batterieelektrische Fahrzeuge (BEV Stufe 4) im Markt wieder an Bedeutung und folgen damit einem ähnlichen Entwicklungspfad wie im Referenzszenario. Um das Reduktionsziel von minus 90 % CO_2-Emissionen bis 2045 zu erreichen, zeigen im Alternativszenario neben BEV auch ICE-XD- und FCEV-Konzepte zusätzliche Marktpotenziale. Wasserstoffbetriebene Verbrennungsmotoren (H_2-ICE) können sich dagegen nicht durchsetzen, ebenso wenig wie Brennstoffzellen-Range-Extender-Konzepte (REEV-FC), die aufgrund der notwendigen großen Traktionsbatterie und der resultierenden Kosten im Modell als nicht wirtschaftlich bewertet werden. Gleiches gilt für verflüssigten Wasserstoff (LH_2), der aus konzeptionellen Gründen im Alternativszenario keine Marktanteile erreicht. Bis 2050 ergibt sich somit ein technischer Mix aus direkt- und indirekt elektrifizierten Antriebskonzepten in den Neuzulassungen schwerer Nutzfahrzeuge.

In Abbildung 37 ist die relative Entwicklung der durchschnittlichen Gesamtbetriebskosten (TCO) sowie der spezifischen CO_2-Emissionen ausgewählter Nutzfahrzeugsegmente im Alternativszenario indirekte Elektrifizierung im Vergleich zur Entwicklung im Referenzszenario (REF) dargestellt. Unterschiede zeigen sich insbesondere in den Simulationsjahren, in denen eine stärkere Marktdurchdringung von FCEV- und ICE-XD Konzepten modelliert ist. Bei den schweren Nutzfahrzeugen (40 t Sattelzugmaschinen) steigen die durchschnittlichen Gesamtbetriebskosten um rund 2 % im Jahr 2040 gegenüber dem Kostenniveau im Referenzszenario an. Dies verdeutlicht, dass FCEV- und ICE-XD Fahrzeuge unter den im Szenario hinterlegten Rahmenbedingungen tendenziell zu höheren Transportkosten führen. Auch bei den spezifischen CO_2-Emissionen zeigt sich ab 2035 ein leicht schwächerer Rückgang als im Referenzszenario stattfindet. Ursache hierfür ist die modellseitige Anrechnung der ICE-XD-Konzepte als CO_2-neutral innerhalb der Flottenregulierung, während in der realen Bilanz weiterhin durchschnittliche Emissionen auftreten. Damit verdeutlicht die Abbildung, dass die im Szenario unterstellte indirekte Elektrifizierung zwar zur Zielerreichung gemäß Regulierung beiträgt, jedoch keine tatsächliche zusätzliche Emissionsminderung gegenüber dem Referenzszenario bewirkt, insbesondere in den schwer zu elektrifizierenden Nutzfahrzeugsegmenten.

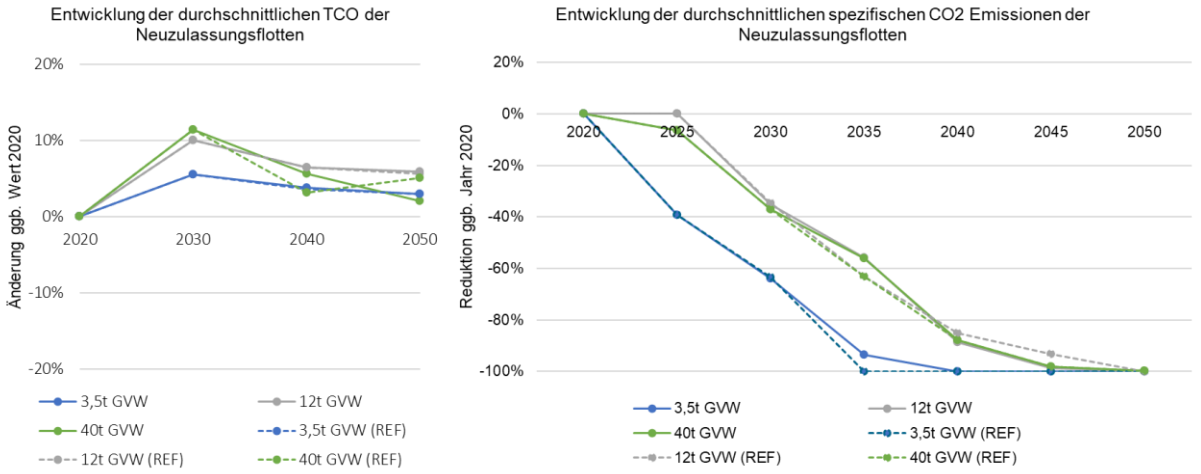


Abbildung 37: Entwicklung der durchschnittlichen Gesamtbetriebskosten (TCO) und spezifischen CO2-Emissionen der Neuzulassungsflotten im Alternativszenario indirekte Elektrifizierung im Vergleich zum Referenzszenario (REF)

Im Gesamtbestand (siehe Abbildung 38) dominiert auch mit breiter Antriebsdiversifikation dennoch der Anteil BEV Stufe 2/3 in der Flotte, da insbesondere das Segment der leichten Nutzfahrzeuge mit starker Elektrifizierungspotential, mit seinem hohen Marktvolumen, den Gesamtmarkt strukturell prägt. Nach 2035 sinkt der Anteil konventioneller Dieselantriebe deutlich und wird übergangsweise durch ICE-XD- und FCEV-Fahrzeuge ersetzt.

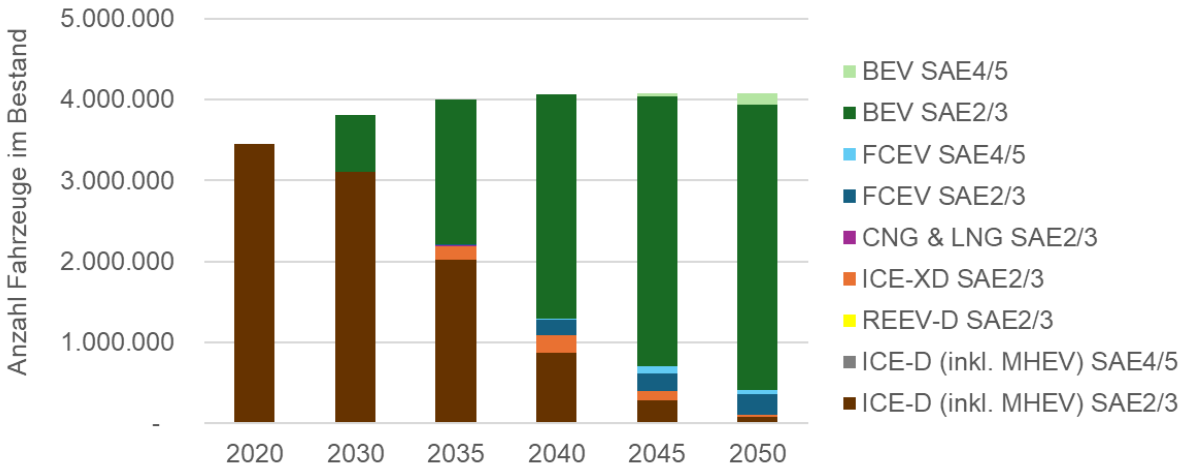


Abbildung 38: Entwicklung der simulierten Bestands-Marktanteile für leichte und schwere Nutzfahrzeuge im Alternativszenario indirekte Elektrifizierung

7.2.3 Alternativszenario: Automatisierung

Die Modellergebnisse der Neuzulassungsanteile für leichte und schwere Nutzfahrzeuge im zweiten Alternativszenario „Automatisierung“ ist in Abbildung 39 aufgezeigt. Die unterstellte Kostendegression der Automatisierungskomponenten sowie die berücksichtigte spezifische Betriebskostenstruktur führen zu einer

beschleunigten Einführung höherer Automatisierungsstufen, die sukzessive mit den jeweiligen Antriebstechnologien gekoppelt werden.

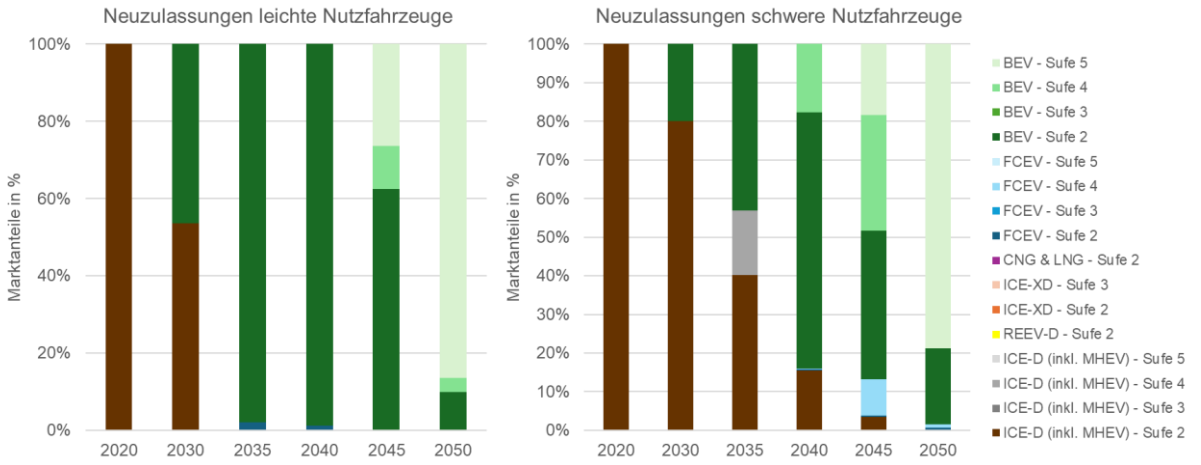


Abbildung 39: Entwicklung der simulierten Neuzulassungen-Marktanteile für leichte (linke Abbildung) und schwere (rechte Abbildung) Nutzfahrzeuge im Alternativszenario Automatisierung

Im LNF-Neuzulassungsmarkt steigen die Marktanteile batterieelektrischer Fahrzeuge (BEV) unter gleichen Rahmenbedingungen hinsichtlich CO_2-Flottenregulierung, Kostendegression der Antriebskomponenten und Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur wie im Referenzszenario bis 2035 kontinuierlich an. Die Teilautomatisierung (Stufe 2) stellt in allen Szenarien die Basiskonfiguration dar, da Fahrerassistenzsysteme aufgrund typgenehmigungsrelevanter Vorschriften für neue leichte und schwere Nutzfahrzeuge verpflichtend sind. Im Vergleich dazu werden die im Modell angenommenen Einsparpotenziale der bedingten Automatisierung (Stufe 3) nicht als ausreichend bewertet, um eine wirtschaftlich tragfähige Markteinführung zu ermöglichen. Ab 2041 setzt sich die Hochautomatisierung (Stufe 4) zunehmend durch, insbesondere im Gütertransport im Fernbereich, wo höhere Einsparpotenziale durch reduzierte Betriebskosten, vor allem in Energieverbrauchs- und Versicherungskosten, simuliert werden. Der Marktanteil hochautomatisierter BEV erreicht bis 2040 rund 11 %. Der Übergang von teil- zu hochautomatisierten Fahrfunktionen verläuft dabei fließend und wird durch sinkende Herstellungskosten der Automatisierungskomponenten, insbesondere der Recheneinheiten und LiDAR-Sensorik, begünstigt. Ab 2045 steigt der Anteil vollautomatisierter (Stufe 5) batterieelektrischer Fahrzeuge deutlich an. Die im Modell abgebildete günstige Betriebskostenstruktur, insbesondere durch den Wegfall der Fahrerkosten, beeinflusst die Kaufentscheidungen der simulierten Agenten erheblich. Allerdings begrenzen einsatzspezifische Faktoren, wie bestehende logistische Bereitschaftszeiten bzw. -tätigkeiten der Fahrer, das realisierbare Kosteneinsparpotenzial, weshalb für 10 % der Käufergruppen vollautomatisierte BEV beschränkt bleibt.

Im Segment der schweren Nutzfahrzeuge zeigt sich eine besonders dynamische Entwicklung. Die bedingte Automatisierung (Stufe 3) setzt sich auch hier nicht gegenüber der Teilautomatisierung (Stufe 2) durch. Aufgrund der im Szenario angenommenen frühzeitigen Markteinführung hochautomatisierter Systeme entscheiden sich Akteure im Fernverkehr verstärkt für Stufe 4. In der frühen Marktphase erreichen auch dieselmotorische Antriebskonzepte (ICE-D) in Kombination mit Stufe 4 relevante Marktanteile, da batterieelektrische Fahrzeuge in diesem Zeitraum für viele Simulationsagenten noch nicht wirtschaftlich erscheinen. Im Jahr 2035 beträgt der Marktanteil solcher ICE-D-Fahrzeuge mit Stufe 4 etwa 17 %. Ab 2035 integriert sich die Marktdiffusion von Elektrifizierung und Automatisierung zunehmend, sodass ab 2045 Hoch- und Vollautomatisierung (Stufen 4 und 5) primär mit batterieelektrischen Antriebssystemen kombiniert werden. Auf Basis der modellierten Bewertungsmethodik, welche die Einsatzfähigkeit und Wirtschaftlichkeit unter relevanten Rahmenbedingungen berücksichtigt, setzt sich die Möglichkeit des vollautonomen Fahrens (Stufe 5) bis 2050 mit batterieelektrischem Antrieb als dominierende Kombination im Markt durch. Dennoch bleibt auch im Jahr 2050 ein Anteil von rund 20 % der schweren Nutzfahrzeuge nicht automatisierbar, insbesondere aufgrund einsatzspezifischer Anforderungen wie hoher logistischer Bereitschaftszeiten. Dieser nicht automatisierbare Anteil ist im leichten Nutzfahrzeugsegment noch höher, da hier ein größerer Anteil der Transportaufgaben im Nahverkehr stattfindet. Gleichzeitig führt die in der Modellmethodik berücksichtigte höhere betriebliche Auslastung vollautonomer Fahrzeuge zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit.

Ein besonderes Nutzfahrzeugkonzept innerhalb der Modellierung stellen fahrerhauslose 40-t-Sattelzugmaschinen (BEV, Stufe 5) dar. Aufgrund des Wegfalls der Fahrerkabine ergibt sich ein geringeres Fahrzeugleergewicht, was wiederum die Auslegung der Batteriekapazität begünstigt. Diese Fahrzeuge erreichen im Jahr 2050 einen Marktanteil von rund 17,6 % innerhalb des schweren Nutzfahrzeug-Neuzulassungsmarkts. Das Marktvolumen der 40t Szm Segments liegt hierbei bei rund 52,7 % des Gesamtmarktvolumens der schweren Nutzfahrzeuge.

In Abbildung 40 ist die relative Entwicklung der durchschnittlichen Gesamtbetriebskosten (TCO) der Neuzulassungsflotten im Alternativszenario Automatisierung im Vergleich zum Referenzszenario dargestellt. Die schnellere Markteinführung höherer Automatisierungsstufen führt langfristig zu deutlichen Kostensenkungen in der Gesamtbetriebskostenrechnung. Im leichten Nutzfahrzeugsegment zeigt sich zunächst ein Kostenanstieg bis 2030 infolge der Elektrifizierung, der sich im weiteren Verlauf wieder abschwächt und bis 2050 nahezu das Ausgangsniveau des Jahres 2020 erreicht. Im schweren Nutzfahrzeugsegment ist dagegen eine deutlich stärkere Kostendynamik erkennbar. Die höhere Marktdurchdringung von hoch- und vollautomatisierten Fahrzeugkonzepten, teilweise

mit Wegfall des Fahrpersonals, führt zu erheblichen Einsparungen. Die Szenarioanalyse zeigt hier ein langfristiges Kostensenkungspotenzial von bis zu 27 % gegenüber dem Basisjahr 2020. Damit verdeutlicht das Szenario, dass insbesondere im Fernverkehr der wirtschaftliche Vorteil automatisierter Fahrzeugkonzepte maßgeblich zur Reduktion der Gesamtbetriebskosten beiträgt.

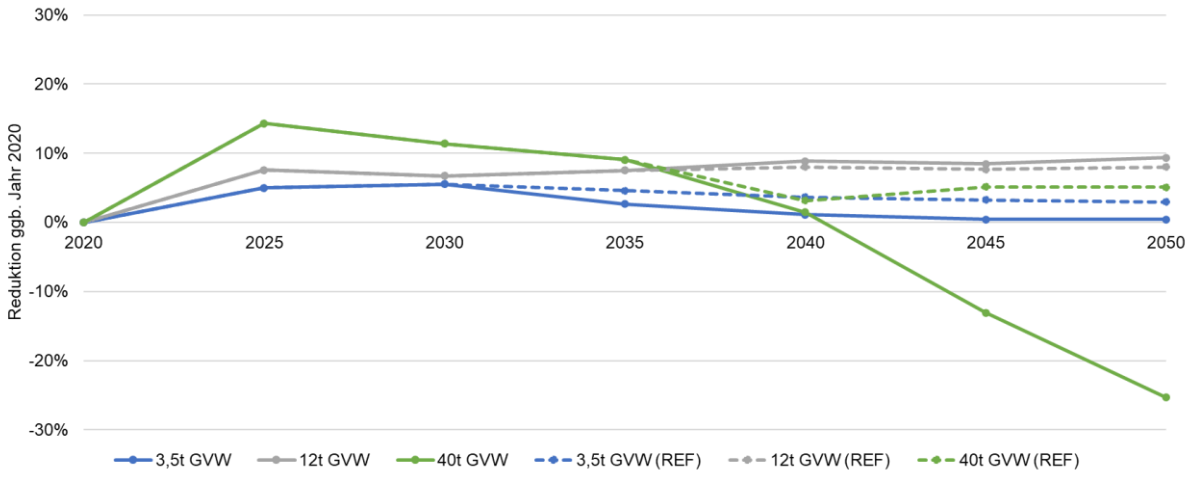


Abbildung 40: Entwicklung der durchschnittlichen Gesamtbetriebskosten (TCO) der Neuzulassungsflotten im Alternativszenario Automatisierung im Vergleich zum Referenzszenario (REF)

Abbildung 41 verdeutlicht die resultierenden Bestandsanteile für leichte und schwere Nutzfahrzeuge. Die Ergebnisse zeigen eine fortschreitende technologische Erneuerung mit steigendem Anteil automatisierter Fahrzeuge in allen Gewichtsklassen. Besonders im Fernverkehr verdrängen automatisierte batterieelektrische und brennstoffzellenbasierte Fahrzeuge bis 2050 nahezu vollständig die konventionellen Antriebe.

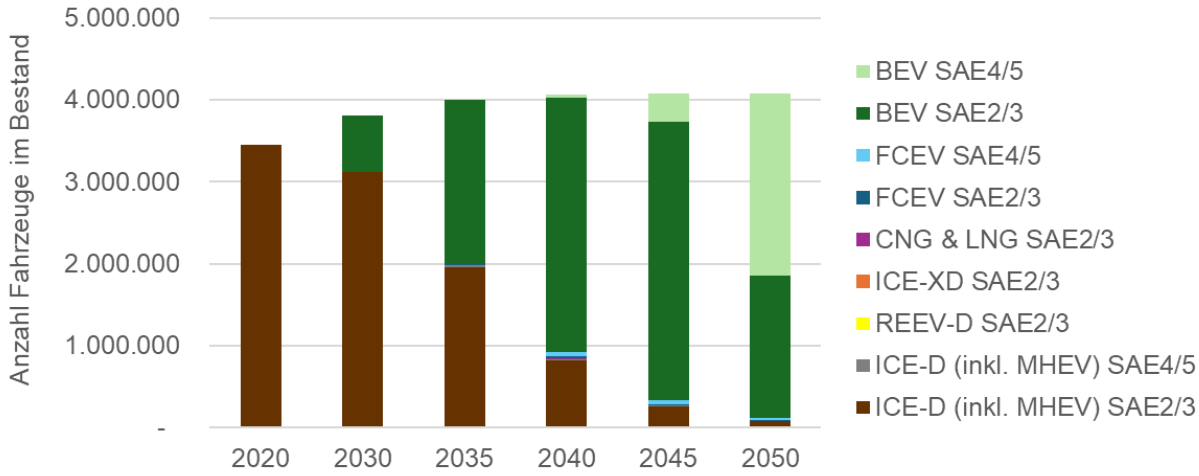


Abbildung 41: Entwicklung der simulierten Bestands-Marktanteile für leichte und schwere Nutzfahrzeuge im Alternativszenario Automatisierung

7.3 Analyse der Energie- und Fahrleistungsentwicklungen im Straßengüterkraftverkehr

Auf Basis der in den Szenarien ermittelten technologischen Marktpotenziale und Bestandsentwicklungen werden die resultierenden jährlichen Fahrleistungsstrukturen sowie der verkehrsbedingte Endenergieverbrauch des Straßengüterverkehrs bis 2050 abgeleitet. Hierbei handelt es sich um die Fahrleistung der deutschen (inländischen) Nutzfahrzeuge im Inland. Die Analysen erfassen sowohl die Verteilung der Fahrleistungen auf die unterschiedlichen Antriebs- und Automatisierungstechnologien als auch den daraus resultierenden Energiebedarf nach Energieträgern in den drei betrachteten Szenarien.

7.3.1 Referenzszenario: Direkte Elektrifizierung

Im Referenzszenario zeichnet sich über den Betrachtungszeitraum eine Verlagerung der Fahrleistungen von konventionellen Dieselantrieben (ICE-D) hin zu elektrisch betriebenen Nutzfahrzeugen (BEV, FCEV) ab. Wie in Abbildung 42 dargestellt, bleibt die Gesamtfahrleistung bis etwa 2030 noch überwiegend von ICE-D geprägt. Ab 2040 nehmen BEV der Automatisierungsstufen 2/3 deutlich an Bedeutung zu, während FCEV insbesondere im Fernverkehr in einem begrenzten Umfang zur Anwendung kommen. Gegen Ende des Betrachtungszeitraums im Jahr 2050 verschiebt sich der Schwerpunkt der modellierten Fahrleistung der deutschen Nutzfahrzeuge zunehmend auf emissionsfreie elektrische Antriebe, wobei hochautomatisierte BEVs (Stufe 4/5) unter den Szenarioannahmen ca. 7% des Gütertransportes im Fernbereich einnehmen könnte.

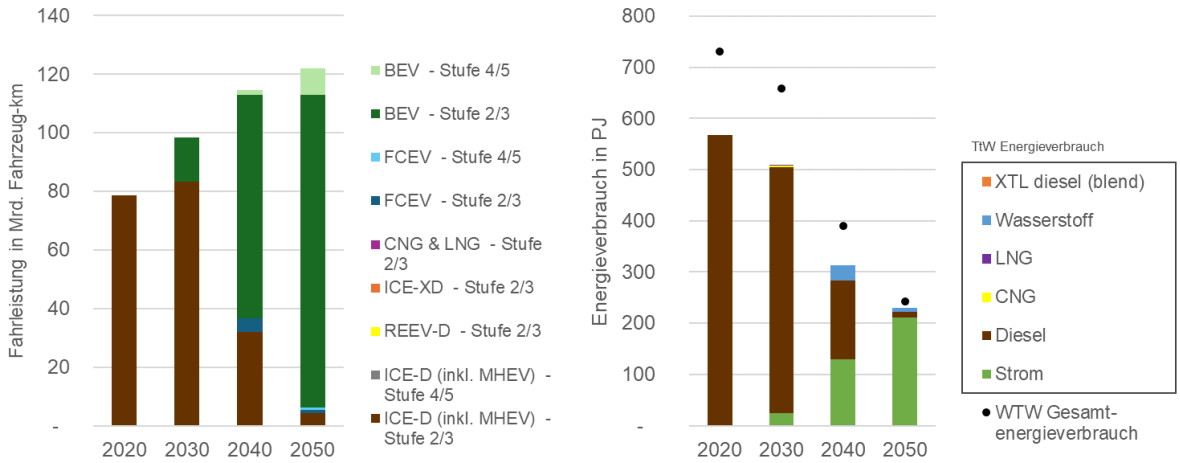


Abbildung 42: Entwicklung der Fahrleistung (links) und des Endenergieverbrauchs (rechts) im Straßengüterkraftverkehr in Deutschland bis 2050 im Referenzszenario „Direkte Elektrifizierung“

Parallel zur Veränderung der Antriebsstruktur zeigt sich im Referenzszenario eine deutliche Reduktion des verkehrsbedingten Endenergieverbrauchs (TtW). Trotz der

zunehmenden Fahrleistung sinkt der gesamte Energiebedarf infolge der höheren Effizienz elektrischer Antriebe kontinuierlich. Auf Basis der modellierten Diffusionspfade reduziert sich der Energieverbrauch von rund 570 PJ im Jahr 2020 auf etwa 230 PJ im Jahr 2050. Diese Entwicklung ist im Wesentlichen auf die zunehmende Marktdurchdringung energieeffizienter elektrischer Antriebe sowie auf die Aussonderung älterer ICE-D zurückzuführen. Zur Verdeutlichung dieser Effizienzsteigerungen ist in Abbildung 43 die Entwicklung des durchschnittlichen Energieverbrauchs der Neu- und Bestandsfahrzeugflotten dargestellt. Zu Beginn des Betrachtungszeitraums (2020) bestehen Neuzulassungen wie auch die Bestandsflotte nahezu vollständig aus dieselmotorischen Antrieben. Die niedrigeren spezifischen Verbräuche der Neufahrzeugflotte gegenüber der Bestandsfahrzeugflotte resultieren dabei aus inkrementelle Effizienzsteigerungen konventioneller Nutzfahrzeuge, während ältere Fahrzeuggenerationen im Bestand noch höhere Verbrauchsniveaus aufweisen. Mit dem zunehmenden Markteintritt elektrischer Antriebsstränge sinkt zunächst der Energieverbrauch der Neufahrzeugflotte, während der Verbrauch der Bestandsflotte mit zeitlicher Verzögerung nachfolgt. Diese Verzögerung ergibt sich aus dem Bestandsalter der Nutzfahrzeuge und den abgeleiteten Abgangswahrscheinlichkeiten. Im Szenarioverlauf ist zudem erkennbar, dass die Erneuerung der schweren Nutzfahrzeugflotte (SNF) schneller erfolgt als bei den leichten Nutzfahrzeugen (LNF), was in Abbildung 43 durch den steileren Rückgang der Energieverbrauchskurve der SNF Flotte verdeutlicht wird. Sobald eine vollständige Marktdiffusion elektrischer Antriebe erreicht ist, gleichen sich die durchschnittlichen Energieverbräuche von Neu- und Bestandsflotten aufgrund des Technologieverteilung sukzessive an.

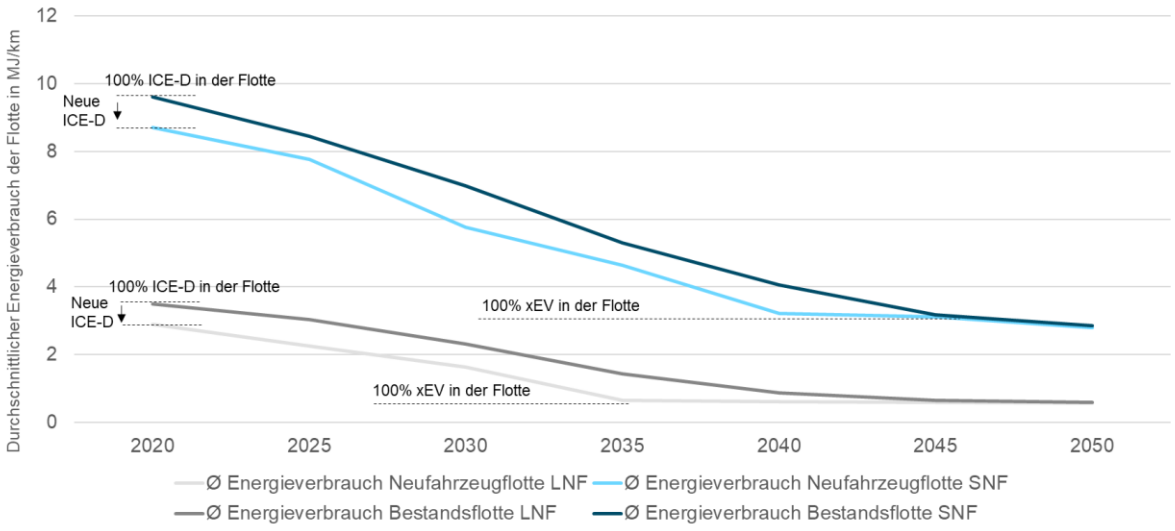


Abbildung 43: Entwicklung des durchschnittlichen Energieverbrauchs der Neu- und Bestandsfahrzeugflotte jeweils für leichte (LNF) und schwere Nutzfahrzeuge (SNF) im Referenzszenario „direkte Elektrifizierung“

Auf Well-to-Wheel-Basis (WtW), also unter Berücksichtigung der Energieumwandlungsverluste und der fahrzeugseitigen Wirkungsgrade, sinkt der gesamte Energieverbrauch im betrachteten Zeitraum um rund 66 % (siehe Abbildung 43 – Punkte im Diagramm). Der Energieeinsatz fossiler Kraftstoffe geht dabei nahezu vollständig zurück, während erneuerbarer Strom den Endenergiemix zunehmend dominiert. Wasserstoff leistet im Referenzszenario lediglich einen begrenzten Beitrag und bleibt auf schwer elektrifizierbare Anwendungen im Fernverkehr beschränkt.

7.3.2 Alternativszenario: Indirekte Elektrifizierung

Im Alternativszenario „indirekte Elektrifizierung“ erfolgt die Dekarbonisierung des Straßengüterkraftverkehrs sowohl über die verstärkte Elektrifizierung der Antriebe als auch über den Einsatz strombasierter flüssiger Energieträger (XTL Diesel). Damit stellt das Szenario einen kombinierten Technologiepfad dar, bei dem die Emissionsminderungen nicht ausschließlich durch Fahrzeugtechnologien, sondern zusätzlich durch CO_2-arme Kraftstoffe erreicht werden. Wie in Abbildung 44 dargestellt, zeigt sich über den Betrachtungszeitraum eine zunehmende Elektrifizierung der Fahrleistungen, wobei BEV und auch FCEV im Jahr 2050 einen bedeutenden Anteil an der Gesamtfahrleistung erreichen. Parallel dazu bleibt ein Teil der Flotte weiterhin verbrennungsmotorisch betrieben, wobei konventioneller Diesel teilweise durch XTL-Diesel ersetzt wird.

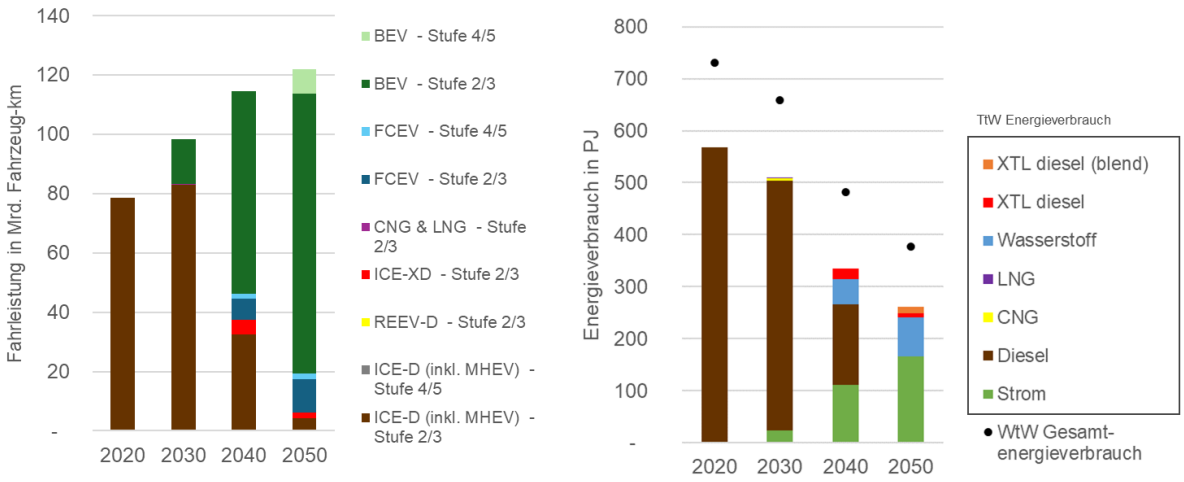


Abbildung 44: Entwicklung der Fahrleistung (links) und des Endenergieverbrauchs (rechts) im Straßengüterkraftverkehr in Deutschland bis 2050 im Alternativszenario „indirekte Elektrifizierung“

Der verkehrsbedingte Endenergieverbrauch (TtW) sinkt auch im Szenario „indirekte Elektrifizierung“, jedoch in geringerem Umfang als bei direkter Elektrifizierung. Ursache ist der weiterhin vorhandene Anteil verbrennungsmotorische Antriebssysteme mit geringeren Wirkungsgraden. Der Energiebedarf verringert sich modellseitig von rund 570 PJ im Jahr 2020 auf etwa 270 PJ im Jahr 2050 (damit 40 PJ

mehr als im Referenzszenario im Jahr 2050). Diese Entwicklung resultiert aus der zunehmenden Marktdurchdringung elektrischer Nutzfahrzeuge, der Effizienzsteigerung konventioneller Nutzfahrzeuge sowie der Substitution fossiler Dieselkraftstoffe durch XTL-Diesel.

Besonderheit dieses Szenarios ist die zusätzliche Berücksichtigung einer XTL-Beimischung, unter Beachtung der technische Rückwärtskompatibilität mit der Bestandsflotte. Die berechnete Menge der XTL-Beimischung wird aus der Berücksichtigung der THG-Minderungsquote abgeleitet. Sie entspricht damit jenem Anteil an Emissionsminderung, der nicht allein durch die Fahrzeugtechnologien erreicht werden kann. Da die Herstellung von XTL-Kraftstoffen mit höheren Energieumwandlungsverlusten verbunden ist, liegt der Gesamtenergieverbrauch (WtW) insgesamt über dem des Referenzszenarios (siehe Abbildung 44). Dies führt zu einem relativ höheren systemischen Energieeinsatz, obwohl der Tank-to-Wheel-Energieverbrauch der Flotte weiter sinkt.

Abbildung 45 zeigt ergänzend die Entwicklung des durchschnittlichen Energieverbrauchs der Neu- und Bestandsflotten für leichte (LNF) und schwere Nutzfahrzeuge (SNF). Ersichtlich ist, dass der Verbrauch der Bestandsflotte mit zeitlicher Verzögerung der Neuwagenflotte folgt. Ab etwa 2040 verläuft die Abnahme des durchschnittlichen Energieverbrauchs der Neufahrzeuge flacher als im Referenzszenario, da sich die Marktadoption der BEV verlangsamt und ein zunehmender Anteil an XTL-Diesel und FCEV zur Erfüllung der CO2-Emissionsnorm der Neuzulassungsflotte beiträgt. Infolgedessen erfolgt die Gesamteffizienzsteigerung moderater, setzt sich jedoch über den weiteren Szenarioverlauf kontinuierlich fort.

Damit lässt sich festhalten, ein großer Teil der Flotteneffizienz kann mittelfristig, innerhalb der Fahrzeughaltedauer, durch technologische Weiterentwicklungen und Marktadoption (Kaufentscheidung) beeinflusst werden. Darüber hinaus ist allerdings über die Nutzungsdauer der Fahrzeuge, daher auf Verkehrsebene, durch die Beimischung der erneuerbaren, komplementären Dieselkraftstoffe (z. B. XTL-Diesel) weitere CO2- Einsparungen (auf Gesamtemissonsbilanzierung) möglich.

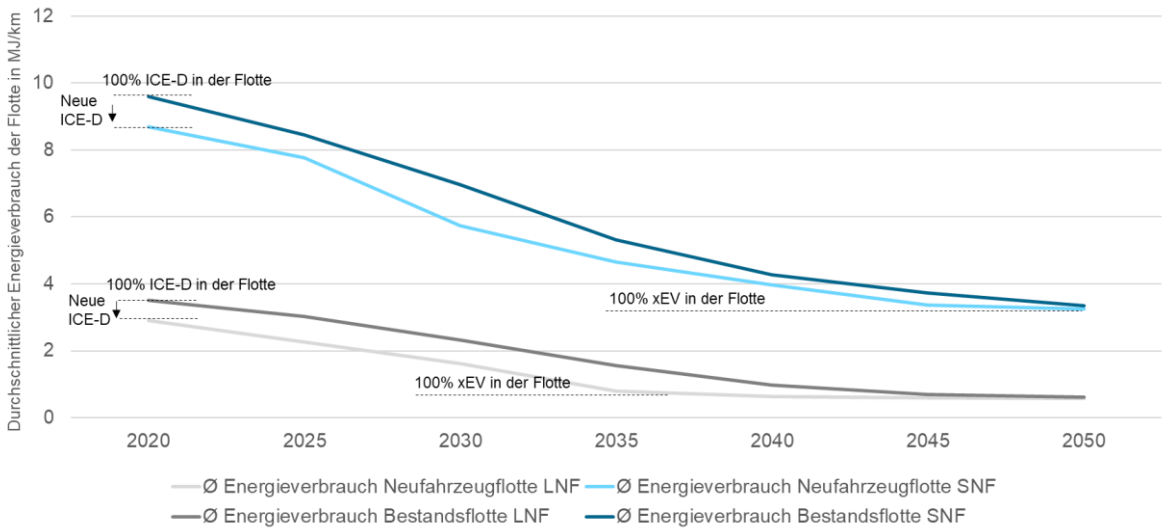


Abbildung 45: Entwicklung des durchschnittlichen Energieverbrauchs der Neu- und Bestandsfahrzeugflotte jeweils für leichte (LNF) und schwere Nutzfahrzeuge (SNF) im Alternativszenario „indirekte Elektrifizierung“

7.3.3 Alternativszenario: Automatisierung

Im Alternativszenario „Automatisierung“ wird die modellierte Technologiediffusion im Straßengüterkraftverkehr sowohl durch eine fortschreitende Elektrifizierung als auch durch die zunehmende Einführung automatisierter Fahrfunktionen geprägt. Wie in Abbildung 46 dargestellt, zeigt sich über den Betrachtungszeitraum eine deutliche Zunahme elektrischer Fahrleistungen, wobei ab 2040 insbesondere der Anteil von Fahrzeugen mit hohen Automatisierungsgraden (Stufe 4/5) stark ansteigt. Diese Fahrzeuge werden vorwiegend im Fernverkehr eingesetzt und verändern dort die Verteilung der gesamten Fahrleistung zwischen den betrachteten Antriebskonzepten. Bis 2050 entfallen wesentliche Teile der modellierten Transportleistung auf batterieelektrische Nutzfahrzeuge (BEV) mit hohem Automatisierungsgrad, während konventionelle ICE nur noch einen geringen Anteil aufweisen. Der modellierte Endenergieverbrauch (Tank-to-Wheel) sinkt im Verlauf des Szenarios kontinuierlich und erreicht im Jahr 2050 rund 217 PJ (siehe rechte Darstellung in Abbildung 46), was einer potentiellen Reduktion um 8 % (13 PJ) gegenüber dem Referenzszenario im Jahr 2050 entspricht.

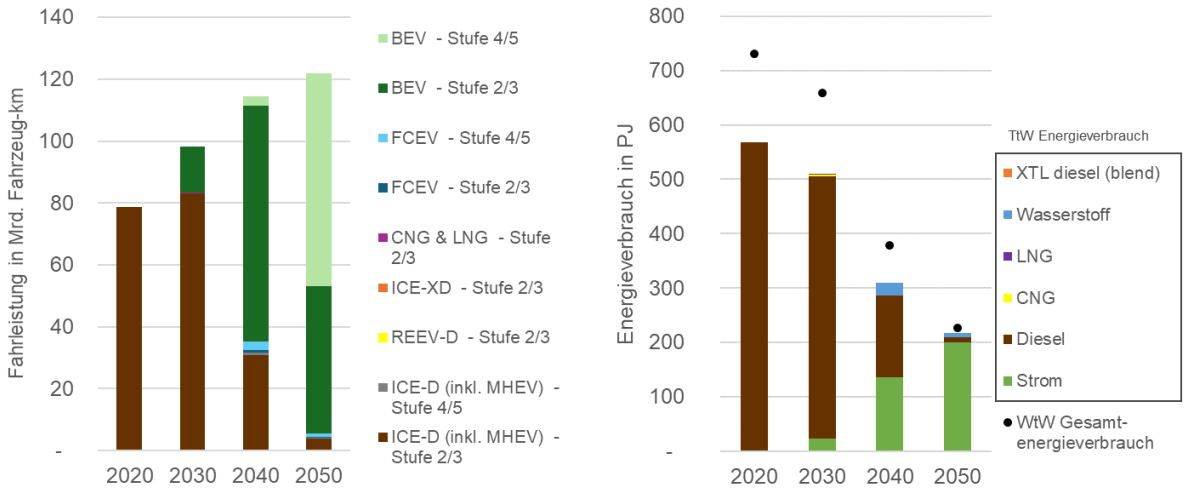


Abbildung 46: Entwicklung Fahrleistung (links) und Endenergieverbrauch (rechts) Straßengüterkaftverkehr in Deutschland bis 2050 Alternativszenario „Automatisierung“

Neben der zunehmenden Verbreitung elektrischer Antriebe beruht dieser Rückgang auf zusätzlichen Effizienzsteigerungen im Betrieb hoch- und vollautomatisierter Nutzfahrzeuge (Stufe 4 und 5). Mit zunehmender Marktdurchdringung von Automatisierungssystemen sind daher weitere, indirekte Effizienzgewinne innerhalb der Flottenmodellierung angenommen. Diese basieren auf der Annahme, dass die fortschreitende Automatisierung und Vernetzung der Nutzfahrzeuge zu einer optimierten Nutzung und damit zu einer höheren Energieeffizienz im Fahrbetrieb führen. Die entsprechenden Effekte werden im Modell als sekundäre Effizienzvorteile berücksichtigt, die sich erst bei einem signifikanten Anteil automatisierter Fahrzeuge im Markt bemerkbar machen (siehe auch Methodik in Kapitel 6.2). So zeigt sich in Abbildung 47, dass mit steigendem Anteil elektrifizierter und automatisierter Fahrzeuge der Energieverbrauch der Neufahrzeugflotte deutlich sinkt, während der Verbrauch der Bestandsflotte mit zeitlicher Verzögerung nachzieht. Ab etwa 2045 ist eine weitere Reduktion des Energieverbrauchs zu erkennen. Damit verdeutlicht das Szenario, dass die Verbesserung der Energieeffizienz nicht allein durch die Marktdurchdringung neuer Antriebstechnologien erklärbar ist, sondern auch durch die zunehmende Verfügbarkeit und Nutzung automatisierter Systeme, deren sekundäre Effekte im realen Betrieb zu einer weiteren Verringerung des Energieverbrauchs führen.

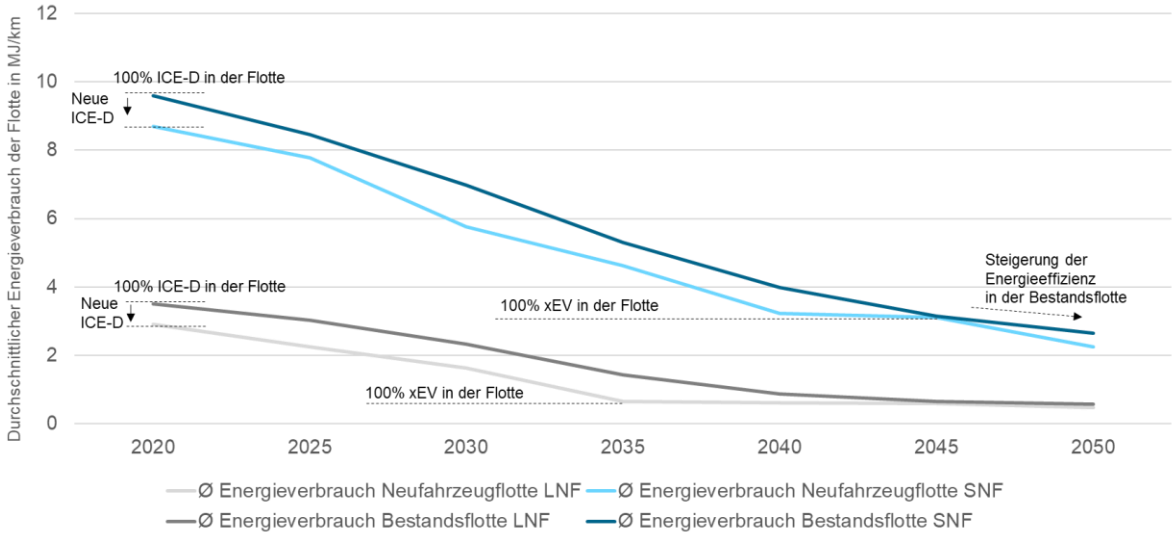


Abbildung 47: Entwicklung des durchschnittlichen Energieverbrauchs der Neu- und Bestandsfahrzeugflotte jeweils für leichte (LNF) und schwere Nutzfahrzeuge (SNF) im Alternativszenario „Automatisierung“

7.4 Einordnung der Szenarioergebnisse

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, dass die Entwicklung der Energieverbräuche im Straßengüterkraftverkehr bis 2050 maßgeblich durch die technologische Zusammensetzung des Fahrzeugbestands und den Anteil direkter bzw. indirekter Elektrifizierung bestimmt wird. Abbildung 48 zeigt den resultierenden End- und Gesamtenergieverbrauch im Jahr 2050 für die drei modellierten Transformationspfade.

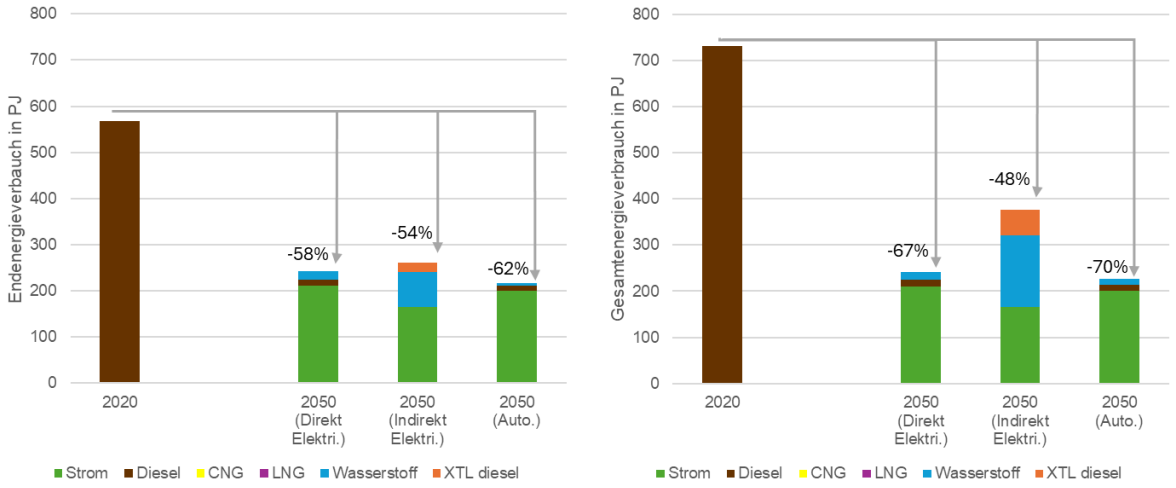


Abbildung 48: Endenergieverbrauch und Gesamtenergieverbrauch des Straßenverkehres im 2050 im Vergleich je Szenario

Der Endenergieverbrauch des Straßengüterkraftverkehrs sinkt in allen Szenarien deutlich gegenüber dem Ausgangsjahr 2020. Während im Ausgangsjahr nahezu der gesamte Energiebedarf über Dieselkraftstoff gedeckt wird, verschiebt sich der Energieträgermix im Jahr 2050 in Richtung elektrischer und wasserstoffbasierter Antriebe. Im Szenario direkter Elektrifizierung entfällt der überwiegende Anteil des Endenergieverbrauchs auf Strom, wodurch eine Reduktion um rund 58 % gegenüber 2020 erreicht wird. Der Energieeinsatz konzentriert sich hier auf die direkte Nutzung elektrischer Energie mit vergleichsweise geringen Umwandlungsverlusten. Im Szenario indirekter Elektrifizierung erfolgt die Bereitstellung der Antriebsenergie über verschiedene Umwandlungspfade. Neben Strom und Wasserstoff kommen insbesondere synthetische flüssige Kraftstoffe (XTL-Diesel) zum Einsatz. Dadurch sinkt der Endenergieverbrauch bis 2050 um etwa 54 %, bleibt jedoch aufgrund der zusätzlichen Umwandlungsstufen energetisch weniger effizient. Das Automatisierungsszenario zeigt eine vergleichbare Energieträgerverteilung wie die direkte Elektrifizierung, jedoch bei nochmals reduziertem Energiebedarf. Durch die höhere Auslastung und Effizienz automatisierter Fahrzeuge sowie durch eine optimierte Betriebsführung wird der Endenergieverbrauch bis 2050 um etwa 62 % gesenkt. Der verbleibende Energiebedarf entfällt nahezu vollständig auf Strom und in geringem Umfang auf Wasserstoff.

Die Betrachtung des Gesamtenergieverbrauchs (WtW) (rechte Darstellung in Abbildung 48) verdeutlicht den Einfluss der jeweiligen Energiebereitstellungsketten. In allen Transformationspfaden sinkt der Gesamtenergieeinsatz deutlich. Im Szenario direkter Elektrifizierung beträgt die Reduktion gegenüber 2020 rund 67 %, da die elektrische Energie ohne wesentliche Umwandlungsverluste genutzt wird. Im Szenario indirekter Elektrifizierung ist der Rückgang mit 48 % geringer ausgeprägt, was auf den zusätzlichen Energieaufwand zur Erzeugung synthetischer Kraftstoffe und von Wasserstoff zurückzuführen ist. Das Automatisierungsszenario weist mit einer Reduktion von 70 % den niedrigsten Gesamtenergieverbrauch auf, was auf die Kombination aus effizientem elektrischem Antrieb und automatisierungsbedingten Effizienzgewinnen im Betrieb zurückzuführen ist.

Bezug auf energie- und klimapolitischen Zielsetzungen in Deutschland

Gemäß dem Bundes-Klimaschutzgesetz hat sich Deutschland verpflichtet, bis zum Jahr 2045 in allen Sektoren, einschließlich des Straßengüterkraftverkehrs, Treibhausgasneutralität zu erreichen und die dafür erforderlichen Maßnahmen umzusetzen [7, 296]. Die nationale Emissionsbilanzierung erfolgt nach dem Territorialprinzip, das heißt, es werden ausschließlich die in Deutschland entstehenden Emissionen berücksichtigt. Wie in Kapitel 2.3.1 erläutert, ist für die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen des Straßengüterkraftverkehrs hierfür die inländische

Fahrleistung maßgeblich [29]. Entsprechend wird die Szenarioanalyse dieser Arbeit auf der Entwicklung des Endenergieverbrauchs der in Deutschland erbrachten Fahrleistung erweitert. Dabei wird der Fahrleistungsanteil ausländischer Nutzfahrzeuge im Inland berücksichtigt, siehe auch Tabelle 48. Die technologische Marktdiffusion und damit die Entwicklung der verkehrsbedingten Energienachfrage werden auf Basis der für deutsche Nutzfahrzeuge ermittelten technologischen Marktanteile abgebildet, jedoch mit einer verzögerten Diffusionsrate, die in Anlehnung an die durchschnittliche Haltedauer der jeweiligen Fahrzeugsegmente, vier Jahre für schwere und fünf Jahre für leichte Nutzfahrzeuge hinterlegt ist. Diese Annahme begründet sich in dem höheren durchschnittlichen Fahrzeugalter osteuropäischer Flotten, die einen wesentlichen Anteil an der in Deutschland erbrachten Fahrleistung stellen. Auf Basis der Inlandsfahrleistung steigt der verkehrsbedingte Endenergieverbrauch im Jahr 2020 um rund 9 % (ggb. Inländerfahrleistung im Referenzszenario) auf etwa 620 PJ an. Die innerhalb der Szenarien hinterlegten CO_2-Regulierungen definieren die Dekarbonisierung als zentrale Anforderung, wodurch die kumulierten Tank-to-Wheel-Emissionen (TtW) bis 2050 je nach Transformationspfad um 95 bis 97 % gegenüber dem Basisjahr 2020 zurückgehen. Damit liegen die modellierten Reduktionspfade im Einklang mit dem nationalen Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045.

Im Hinblick auf die energiepolitischen Zielsetzungen Deutschlands zeigen die Modellergebnisse, dass das im Klimaschutzprogramm 2030 formulierte Ziel, bis 2030 rund ein Drittel der Fahrleistung im schweren Straßengüterkraftverkehr elektrisch oder auf Basis strombasierter Kraftstoffe zu erbringen [283] in keinem der untersuchten Szenarien vollständig erreicht wird. Ursache hierfür ist die bislang noch geringe Marktdurchdringung entsprechender Antriebe sowie die im Modell berücksichtigten Erneuerungszyklen der Fahrzeugflotten, die einen technologischen Wandel nur schrittweise zulassen. Der Anteil elektrifizierter oder strombasierter Antriebe steigt zwar kontinuierlich an, bleibt jedoch bis 2030 deutlich unterhalb der Zielmarke.

Langfristig hingegen zeigen alle Szenarien, dass durch die zunehmende direkte Elektrifizierung des Antriebsstrangs die energiepolitische Zielsetzung einer deutlichen Effizienzsteigerung bis 2050 erreicht werden kann. Der modellierte Rückgang des Endenergieverbrauchs um bis zu 62 % steht im Einklang mit der nationalen Energieeffizienzstrategie 2050 [297], die eine Reduktion des Endenergieverbrauchs um etwa 40 bis 45 % gegenüber 2008 anstrebt.

Vergleich mit bestehenden Fahrzeugmarkt-Szenarioanalysen

Ergänzend erfolgt eine Einordnung der Modellergebnisse im Kontext bestehender nationaler Szenarien und Studien. Insgesamt zeigen die vorliegenden Ergebnisse eine

hohe Übereinstimmung mit den zentralen fahrzeugtechnologischen Trends, die in jüngeren Untersuchungen zum Straßengüterkraftverkehr identifiziert wurden. Gleichwohl ergeben sich Unterschiede in der Dynamik, Untersuchungstiefe und methodischen Abbildung der Transformation, die insbesondere auf die modellseitige Kombination von direkter und indirekter Elektrifizierung sowie Automatisierung zurückzuführen sind.

Im Vergleich zu [31] bestätigen die eigenen Szenarien die Richtung der Marktentwicklung, zeigen jedoch eine geringfügig verzögerte Elektrifizierungsdynamik. Während [31] bereits bis 2045 eine vollständige Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge annimmt, wird dieser im Szenario „direkte Elektrifizierung“ erst gegen 2050 erreicht. Diese Abweichung resultiert aus der expliziten Abbildung von segmentspezifischen Flottenerneuerungszyklen, wodurch die Marktdurchdringung realitätsnäher beschrieben wird. Zugleich liegt der modellseitig berechnete Anteil batterieelektrischer Fahrzeuge im gleichen Größenbereich, wodurch die grundsätzliche Plausibilität des Transformationspfads bestätigt wird. Auch die in [298] dargestellten Ergebnisse der „Langfristszenarien“ zeigen eine vergleichbare Effizienzsteigerung durch direkte Elektrifizierung. Mit einer Reduktion des Endenergieverbrauchs um 50 bis 60 % liegen die dort ermittelten Werte in ähnlicher Größenordnung wie die in dieser Arbeit abgeleiteten Ergebnisse. Unterschiede bestehen primär in der zeitlichen Einordnung. Während [298] bereits bis 2040 eine weitgehende Elektrifizierung des Bestands erreicht, verschiebt sich diese Entwicklung im vorliegenden Modell leicht in das Simulationsjahr 2045. Die in [299] dargestellten Resultate stützen die im Modell angenommene Dominanz BEV gegenüber FCEV auch im SNF-Segmenten. Gleichzeitig bestätigen sie den in dieser Arbeit angenommenen Zusammenhang zwischen frühzeitigen Aufbau in Ladeinfrastruktur und langfristigen Kostenvorteilen durch geringere Betriebs- und Energiekosten. Im Gegensatz zu den in [299] verwendeten aggregierten Kostenszenarien erlaubt das hier entwickelte Fahrzeugmarktmodell jedoch eine differenzierte Bewertung auf Fahrzeugebene unter expliziter Berücksichtigung betrieblicher Energiebedarfe und Nutzungsmuster.

Die Analyse der Automatisierungsszenarien in [38] und [300] zeigt inhaltlich konsistente Ergebnisse zu den in dieser Arbeit modellierten Effizienzpotenzialen. Die späte, aber vollständige Marktdurchdringung von Stufe 5 bei schweren Nutzfahrzeugen bis 2050 sowie die quantifizierten Energieeinsparungen stimmen mit den modellseitig berechneten sekundären Effizienzgewinnen überein. Ergänzend bestätigen die in [300] ausgewiesenen Sensitivitäten hinsichtlich des zusätzlichen Energiebedarfs für Datenverarbeitung (hier hinsichtlich Automatisierungskomponente: Zentrales Steuergerät), dass die energetische Wirkung automatisierter Systeme stark von der Automatisierungsstrategie abhängt. Das in dieser Arbeit angenommene Maß an Vernetzung und zusätzlichem Energiebedarf bewegt sich damit im Bereich der in aktuellen Studien ermittelten Werte.

8 Schlussfolgerung und Ausblick

Im Mittelpunkt dieser Arbeit stand die Analyse der Marktpotenziale konkurrierender Kraftstoff-, Antriebsstrang- und Automatisierungsoptionen für leichte und schwere Nutzfahrzeuge im deutschen Neuwagen- und Bestandsmarkt. Dabei wurden die Flottenerneuerungsgeschwindigkeit, die Verfügbarkeit der Energieinfrastruktur sowie das Transportaufgaben als zentrale Einflussgrößen berücksichtigt, die die technologische Diffusion und damit die Entwicklung möglicher Dekarbonisierungspfade des Straßengüterkraftverkehrs wesentlich prägen. Zu diesem Zweck wurde ein integriertes Fahrzeugmarktmodell entwickelt. Das Modell wurde auf Grundlage historischer Marktdaten validiert und hinsichtlich zentraler Parameter auf seine Sensitivität geprüft. Die Szenarioanalysen ermöglichten eine Bewertung der Wirksamkeit und Effizienz verschiedener technologischer Pfade, wobei die Auswirkungen alternativer Rahmenbedingungen auf die Marktanteile der Fahrzeugtechnologien sowie auf den verkehrsbedingten Energieverbrauch und die CO_2-Emissionen untersucht wurden. Auf diese Weise konnten die Zusammenhänge zwischen technologische Entwicklung, Marktmechanismen und klimapolitischen Zielsetzungen systematisch aufgezeigt werden.

8.1 Schlussfolgerung

Im Szenario der **direkten Elektrifizierung** zeigt sich eine zeitlich gestaffelte Diffusion alternativer Antriebstechnologien, die durch das Zusammenspiel aus CO_2-Flottenregulierung, technologischer Kostendegression und dem Ausbau der öffentlichen Ladeinfrastruktur geprägt ist. Die Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass der Markthochlauf der BEV zunächst im Segment der leichten Nutzfahrzeuge einsetzt und sich in den weiteren Simulationsjahren schrittweise auf mittlere und schwere Fahrzeugklassen ausweitet. Voraussetzung hierfür ist der schnelle Ausbau des öffentlichen Ladeinfrastrukturnetzes gemäß der politischen Zielsetzung in der AFIR (Netzdichte unter 100km im Fernbereich angenommen), insbesondere für den Gütertransport im Fernbereich, sowie die Fortführung ökonomischer Anreize für Flottenbetreiber wie beispielsweise Mautreduzierungen für emissionsfreie Fahrzeuge. Unter diesen Rahmenbedingungen steigt der Anteil batterieelektrischer Antriebe bis 2035 deutlich an, während Hybridkonzepte und gasbasierte Antriebe keine Rolle spielen. Allerdings wird mit dem Ausbau einer öffentlichen Schnell- und Hochleistungsladeinfrastruktur ein moderater Anstieg der Ladestrompreise in der Szenarioanalyse vorausgesetzt (z.B. bis zu 0,50 €/kWh für MCS-Ladevorgänge).

Das Szenario der **indirekten Elektrifizierung** verdeutlicht, dass die Integration strombasierter Kraftstoffe im Straßengüterverkehr nur ein begrenztes, jedoch gezielt nutzbares Potenzial bietet. Der Einfluss auf die Zusammensetzung der Bestandsflotte

sowie auf die Emissionsminderung hängt dabei maßgeblich von der Verfügbarkeit und den Kosten dieser Kraftstoffe ab. Unter der Annahme ihrer regulatorischen Anrechenbarkeit innerhalb der CO_2-Flottenregulierung können strombasierte Dieselkraftstoffe insbesondere in Segmenten mit hohen Fahrleistungsanforderungen vorübergehend einen Beitrag zur Reduktion der Emissionsintensität leisten. Die Ergebnisse zeigen jedoch deutlich, dass dieser Ansatz energetisch weniger effizient ist: Die Well-to-Wheel-Energieverbräuche liegen signifikant über jenen der direkten Elektrifizierung. Daraus ergibt sich, dass strombasierte Kraftstoffe nur dort sinnvoll eingesetzt werden können, wo eine vollständige Elektrifizierung technisch oder infrastrukturell nicht realisierbar ist. Ihr Integrationspotenzial bleibt somit auf spezifische Nischenanwendungen beschränkt, in denen sie langfristig eine ergänzende Funktion im Energiesystem übernehmen können. Zugleich wurde in der Szenarioanalyse unterstellt, das strombasierte Kraftstoffe nahezu vollständige Emissionsminderungen gegenüber fossilen Dieselkraftstoffen ermöglichen, und damit sie ausschließlich aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt werden.

Hinsichtlich wasserstoffbasierte Antriebskonzepte zeigt die Szenarioanalyse eine wachsende Bedeutung im Fernverkehr. Brennstoffzellen-elektrische Antriebssysteme konkurrieren hier mit batterieelektrischen Antriebssystemen und strombasierten flüssigen Kraftstoffen um den Gütertransport im Fernbereich. Im Szenario der indirekten Elektrifizierung steigt ab 2035 ein merklichen Marktpotenzial zwischen 15 und 22 % im Segment der schweren Nutzfahrzeuge, vorausgesetzt, der Ausbau der Wasserstofftankstelleninfrastruktur erfolgt im Einklang mit den politischen Zielsetzungen (AFIR). Die Wettbewerbsfähigkeit dieser Technologie hängt somit entscheidend von der Verfügbarkeit kostengünstigen, grünen Wasserstoffs sowie von der Infrastrukturentwicklung ab.

Das Szenario **Automatisierung** zeigt, dass sich der Hochlauf automatisierter Nutzfahrzeuge komplementär zur Elektrifizierungspfad entwickelt und beide Transformationspfade gegenseitig verstärken. Unter Berücksichtigung der ökonomischen und betrieblichen Effizienzpotentiale ergibt sich ein zusätzlicher Wachstumseffekt im Markt, der die Einführung neuer Nutzfahrzeugkonzepte weiter beschleunigen kann. Die Simulationsergebnisse verdeutlichen hierzu, dass der Markthochlauf automatisierter Fahrzeuge ab dem Simulationsjahr 2030 vor allem im Gütertransport des Fernbereich einsetzt, dort wo höhere Automatisierungsgrade (Stufe 4 und perspektivisch Stufe 5) als technisch und betrieblich einsatzfähig bewertet werden. Der Anstieg der Marktanteile automatisierungsgradspezifischer Konfigurationen verläuft zunächst moderat, beschleunigt sich jedoch deutlich mit dem Übergang zu hoch- und vollautomatisierten Systemen. Im Zusammenspiel mit elektrifizierten Antrieben entsteht weitere Potentiale: Durch den Wegfall fahrerbezogener Einschränkungen und Kosten, entsteht eine höheres betriebliches Auslastungspotential, welche in der erweiterten Fahrzeugnutzungskosten der

Nutzfahrzeugkonzepte zu geringen RCO/km führt. In Kombination mit den spezifischen Betriebskostenvorteilen elektrischer Antriebe führt dies schließlich im Flottendurchschnitt zu einer Reduktion der Fahrzeugnutzungskosten pro transportierte Tonnenkilometer. Bei fortschreitender Marktdurchdringung vernetzter Fahrzeugkonzepte (Automatisierungsstufe 4 und 5) übersteigen die betrieblichen Effizienzgewinne damit den energiebedingten Mehraufwand durch die Automatisierungskomponente. Dadurch ergibt sich auch auf Verkehrsebene ein tendenziell niedrigerer spezifischer Endenergieverbrauch, insbesondere bei automatisiert betriebenen batterieelektrischen Fahrzeugen.

Technologische Differenzierung im schweren Nutzfahrzeugmarkt (ab 18t zGG.)

Die Szenarioanalysen zeigen, dass sich die technologischen Unterschiede im Marktverlauf besonders deutlich im Segment der schweren Nutzfahrzeuge zeigen. Während in den leichten Fahrzeugklassen ein klarer Trend zur Elektrifizierung erkennbar ist, bleibt der Neuzulassungsmarkt schwerer Nutzfahrzeuge bis 2040 durch eine größere technologische Diversifizierung geprägt. Abbildung 49 verdeutlicht, dass sich im Vergleich der Szenarien nicht ein einzelner Antriebsstrang durchsetzt, sondern eine schrittweise Verschiebung des Marktgleichgewichts zwischen batterieelektrischen, brennstoffzellenbasierten und verbrennungstechnischen Konzepten erfolgen kann.

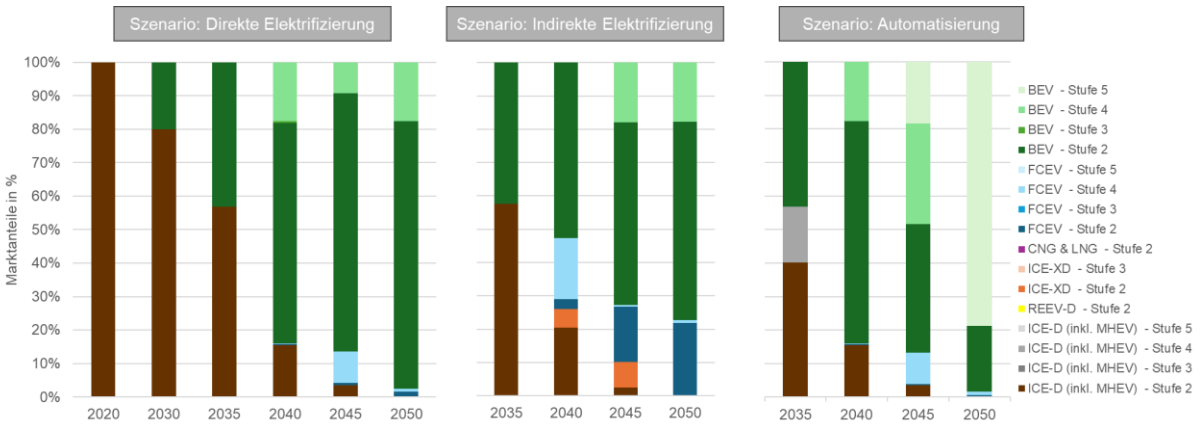


Abbildung 49: Vergleich der Marktpotentiale konkurrierender Antriebsstrang- und Automatisierungstechnologien im schweren Nutzfahrzeugmarkt in verschiedenen Szenarien

Im Szenario der direkten Elektrifizierung zeigt sich, dass batterieelektrische Fahrzeuge trotz ihrer hohen Effizienz erst nach 2040 einen dominierenden Anteil erreichen, da technologische Einschränkungen bei Batteriekapazität und Ladeleistung den Einsatz

im Fernverkehr verzögern. Im Szenario der indirekten Elektrifizierung bleibt der Anteil konventioneller und auf XTL-basierende Verbrennungssysteme deutlich höher, da die Substitution über Kraftstoffe statt über Antriebstechnologien erfolgt. Im Automatisierungsszenario wird schließlich erkennbar, dass die Marktdurchdringung höhere Automatisierungsgrade sich mit der Elektrifizierung durch betriebliche Effizienzgewinne beschleunigen.

Diese Heterogenität der technologischen Pfade im schweren Nutzfahrzeugmarkt weist auf eine strukturelle Komplexität hin, die eine einheitliche Dekarbonisierungsstrategie erschwert. Hersteller und Zulieferer sind daher gefordert, parallel mehrere Entwicklungslinien aufrechtzuerhalten, um auf technologische und regulatorische Unsicherheiten reagieren zu können. Für Energieinfrastrukturakteure ergibt sich daraus die Notwendigkeit, den Ausbau sowohl der Ladstationen als auch der Wasserstofftankstellen zu fördern.

Entwicklung des Endenergieverbrauchs und gesamtenergetische Wirkung der Szenarien

Die Wirkung der technologischen Diffusion auf den verkehrsbedingten Endenergieverbrauch zeigt, dass die Reduktion der CO_2-Emissionen im Straßengüterkraftverkehr nicht allein durch den Ersatz konventioneller Antriebe erreicht wird, sondern wesentlich vom energetischen Wirkungsgrad der eingesetzten Technologien abhängt. Wie in Abbildung 50 dargestellt, sinkt der Endenergieverbrauch in allen Szenarien deutlich. Im Szenario der direkten Elektrifizierung werden die größten Einsparungen erzielt, da der Energiebedarf batterieelektrischer Fahrzeuge aufgrund der hohen Umwandlungseffizienz deutlich unter dem fossilen oder synthetischen Energieträger liegt. Allerdings ist diese Entwicklung an einen zügigen und flächendeckenden Ausbau der Ladeinfrastruktur gebunden. Eine beschränkte Geschwindigkeit dieses Ausbaus würde daher dazu führen, dass der Übergang zu elektrischen Antrieben in den ersten beiden Jahrzehnten moderat bleibt und erst mit zunehmender Netzstabilität und Ladeverfügbarkeit beschleunigt verläuft.

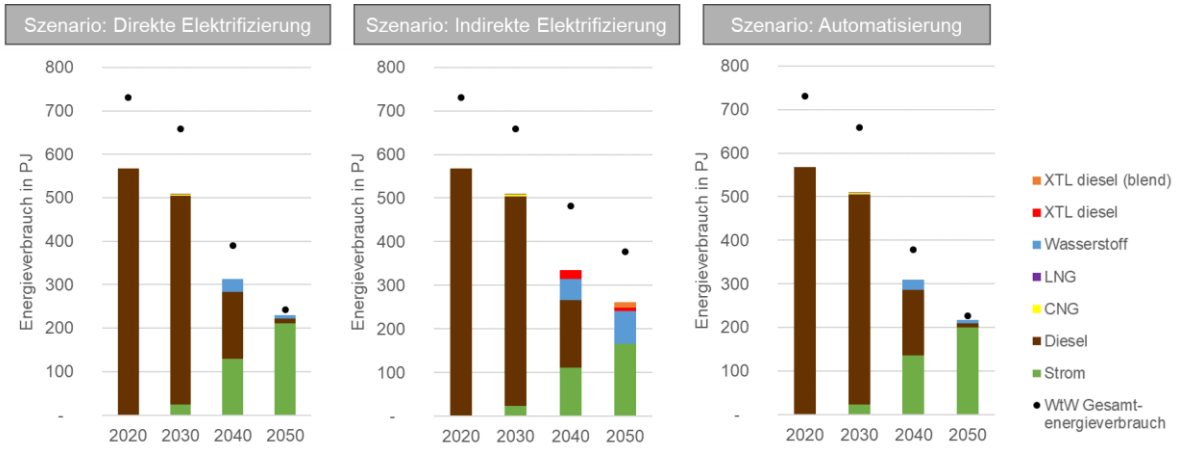


Abbildung 50: Vergleich des Endenergieverbrauchs im Straßengüterkraftverkehr in Deutschland bis 2050 in verschiedenen Szenarien

Im Szenario der indirekten Elektrifizierung bleibt der Energieverbrauch bis 2050 höher, obwohl der Anteil synthetischer Kraftstoffe zunimmt. Dies liegt an den hohen Umwandlungsverlusten bei der Herstellung von Wasserstoff und erneuerbaren Dieselkraftstoff, deren Gesamtwirkungsgrad vom Primärstrom bis zum Rad etwa ein Viertel des direkten elektrischen Pfads beträgt. Damit wird deutlich, dass eine breite Nutzung strombasierter Kraftstoffe erhebliche Menge an erneuerbaren Strom erfordern würde, deren Bereitstellung sowohl ökonomisch als auch infrastrukturell bereits heute limitiert ist.

Das Szenario der fortgeschrittenen Automatisierung zeigt hingegen, dass betriebliche Effizienzgewinne, den Energiebedarf weiter senken können. Diese indirekten Effekte reduzieren den spezifischen Energieverbrauch, ohne dass zusätzliche technologische Umstellungen notwendig sind. Automatisierung wirkt unter den Szenarioannahmen somit als Verstärker für die gesamtenergetische Effizienz, insbesondere in Kombination mit elektrischen Antrieben.

Aus der Gesamtschau der Szenarien ergibt sich, dass die Dekarbonisierung des Straßengüterkraftverkehrs zwar technisch erreichbar, aber stark von der Synchronisierung zwischen Energie- und Verkehrssystem abhängt. Eine unkoordinierte Transformation birgt die Gefahr von Zielkonflikten zwischen Infrastrukturkapazität, Energiebedarf und CO_2-Regulierung. Politisch wirksame Maßnahmen sollten daher nicht allein auf die Verschärfung der Flottenemissionsziele ausgerichtet sein, sondern zugleich die energie- und infrastrukturseitigen Voraussetzungen adressieren.

Handlungsempfehlung für Akteure

Auf Basis der Szenarioanalyse verschiedener Dekarbonisierungspfade lässt sich für **Nutzfahrzeughersteller** ableiten, dass Investitionen in Verbrennungstechnologien nur dort gerechtfertigt sind, wo regulatorische Übergangszeiträume genutzt werden können. Das Szenario der indirekten Elektrifizierung weist hierbei auf ein limitiertes Potenzial zur Aufrechterhaltung der Motorenproduktion über das Jahr 2040 hinaus hin, während sich die Rolle klimaneutraler Verbrennungskonzepte zunehmend auf Übergangs- und Nischenanwendungen beschränkt. Für die Hersteller bedeutet dies, dass die zeitliche Staffelung technologischer Portfolios von zentraler Bedeutung ist: Während Hersteller leichter Nutzfahrzeuge bereits frühzeitig auf rein elektrische Plattformen setzen sollten, ist im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge mittelfristig ein Mix aus unterschiedlichen Antriebsstrangoptionen und Komponenten zu erwarten.

Für **Energieversorger und Kraftstoffproduzenten** ergibt sich der Handlungsbedarf, den Markthochlauf strom- und wasserstoffbasierter Energieträger zeitlich mit der zunehmenden Elektrifizierung des Fahrzeugbestands zu synchronisieren. Aus regulatorischer Perspektive können strombasierte Kraftstoffe als Beimischung genutzt werden, um bei stockender Elektrifizierung den Anteil fossiler Kraftstoffe im Straßengüterverkehr zu senken und so zur Erfüllung der THG-Quoten im Energiesektor beizutragen. Das Potenzial bleibt jedoch insgesamt begrenzt: Einerseits zeigt die Szenarioanalyse der indirekten Elektrifizierung, dass zur Erreichung der THG-Ziele bis 2040 nur geringe Beimischungsmengen synthetischer Dieselkraftstoffe erforderlich wären. Andererseits schränken sowohl die begrenzte Verfügbarkeit erneuerbarer Strommengen als auch die Wettbewerbssituation mit anderen Sektoren, insbesondere mit solchen, deren Dekarbonisierungsoptionen weniger vielfältig sind, den großflächigen Einsatz strombasierter Kraftstoffe im Straßengüterverkehr deutlich ein. Gleichzeitig erfordert das Potenzial der Elektrifizierung einen beschleunigten Ausbau der Ladeinfrastruktur, insbesondere der Schnell- und Hochleistungsladepunkte, um unterschiedliche Betriebskonzepte und Nutzungsszenarien abbilden zu können.

Für **Flottenbetreiber** können strombasierte Kraftstoffe bereits heute eine Übergangsoption darstellen, um bestehende Dieselfahrzeugflotten schrittweise zu dekarbonisieren, insbesondere für große Logistikunternehmen, die im Rahmen ihrer Nachhaltigkeitsberichterstattung Transportemissionen offenlegen müssen. Allerdings zeigen die bisherigen Kostenanalysen, dass hierfür gezielte ökonomische Anreize notwendig sind, um diese Technologien marktattraktiv zu machen. Durch die Aufnahme der Norm für paraffinischen Kraftstoffe, DIN EN 1594, in nationale Kraftstoffnorm EN590 ist die technische Rückwärtskompatibilität bereits sichergestellt, sodass biogene und synthetische Varianten wie HVO heute zugänglich sind. Dennoch ist das Potenzial biogener Ressourcen begrenzt, wodurch ihr Beitrag zur Substitution

fossiler Kraftstoffe im Straßengüterverkehr langfristig nur ergänzenden Charakter haben dürfte. Darüber hinaus ergibt sich für Flottenbetreiber neben der Elektrifizierung zudem der strategische Handlungsbedarf, organisatorische und technische Kompetenzen zur Integration automatisierter Fahrzeuge in bestehende Betriebsstrukturen aufzubauen.

Die vorliegende Arbeit zeigt insgesamt, dass klimafreundliche Nutzfahrzeugkonzepte auf der Basis energieeffizienter Antriebe, hoher Automatisierungsgrade und einer nachhaltigen Energieträgerauswahl sowohl für Neufahrzeuge als auch für den Bestand entscheidend sind. Mit dem heutigen Technologieportfolio würde ein weiteres Transportwachstum zu einem weiteren Anstieg der CO_2-Emissionen führen, im klaren Widerspruch zu den deutschen und europäischen Klimazielen. Die Elektrifizierung des Nutzfahrzeugverkehrs bietet dagegen die Möglichkeit, den Verkehrswachstum von den CO_2-Emissionen zu entkoppeln, da sie ein erhebliches Potenzial zur Reduktion der Energienachfrage aufweist.

8.2 Wissenschaftlicher Beitrag und Einordnung der Arbeit

Der wissenschaftliche Beitrag dieser Dissertation liegt in der Entwicklung eines integrierten, technologieübergreifenden Fahrzeugmarktmodells, das erstmals die Kopplung von Antriebs-, Energie- und Automatisierungstechnologien auf Fahrzeug- und Marktebene mit technisch-ökonomischen Entscheidungsprozessen verbindet. Das Modell bildet die kausalen Zusammenhänge zwischen Einsatzfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und ökologischer Wirkung ab und ermöglicht dadurch eine mehrdimensionale Bewertung zukünftiger Nutzfahrzeugkonzepte. Die Arbeit leistet hierbei einen wesentlichen methodischen und inhaltlichen Fortschritt gegenüber bestehenden Modellen zur Analyse technologischer Pfade im Straßengüterkraftverkehr. Drei zentrale Merkmale kennzeichnen den wissenschaftlichen Mehrwert dieser Dissertation:

1. Durch die durchgängig integrierte und fahrzeugsystemische Betrachtung wird eine kombinierte Technologiebewertung alternativer Energieträger, Antriebssysteme und Fahrerassistenz- bzw. Automatisierungssysteme ermöglicht. Erstmals werden die Automatisierungsgrade und deren Effizienzpotenziale im Kontext der Antriebsstrangmodellierung und der Flottenentwicklung abgebildet. Auf diese Weise werden parallele Technologietrends konsistent berücksichtigt und das Portfolio möglicher Fahrzeugvarianten erweitert.
2. Die Entscheidungsfindung innerhalb des Markmodells erfolgt auf Grundlage einer mehrdimensionalen Bewertung von antriebsstrang- und automatisierungsgradspezifischen Nutzfahrzeugkonzepten, das technische,

betriebliche und ökologische Kriterien integriert. Dabei wird die Einsatzfähigkeit und Wirtschaftlichkeit alternativer Fahrzeugkonzepte in unterschiedlichen Einsatzprofilen bewertet.

3. Das entwickelte Gesamtmodell verknüpft ein agentenspezifisches Neufahrzeugmarktmodell mit einem dynamischen Bestandsmodell zur Simulation der Flottenentwicklung in verschiedenen Szenarien. Neben Käuferagenten werden auch Hersteller- und Infrastrukturagenten berücksichtigt, wodurch Wechselwirkungen zwischen Angebot, Nachfrage und Energieinfrastruktur abgebildet werden. Im Vergleich zu klassischen Diffusionsmodellen erlaubt dieser Ansatz die modellinterne Abbildung der evolutionären Diffusion von Fahrzeugtechnologie-Innovationen und damit die Bewertung ihrer Wirkungen auf Flottenzusammensetzung, Energieverbrauch und Emissionen über die gesamte Nutzungsphase hinweg. Durch die Berücksichtigung zeitabhängiger und dynamischer Faktoren, wie Lernkurven, Energiepreise und technologische Verbesserungen, können realistischere und differenziertere Diffusionsverläufe berechnet werden. Besonders ist hierbei die Modellierung sekundäre Effizienzpotentiale durch die Vernetzung der Nutzfahrzeuge im Bestand sowie die an die THG-Quoten regulierte Beimischung erneuerbarer Kraftstoffe im Rahmen einer Fahrzeugmarktsimulation.

Damit schließt die Arbeit die aufgestellten Forschungslücken (vgl. Abbildung 1), schafft deutlich belastbarere Aussagen über zukünftige Marktdurchdringungen als bisherige Ansätze. Der entwickelte Rahmen erlaubt es, sowohl die wirtschaftlichen als auch die ökologischen Wirkungen von Transformationspfaden im Straßenkraftgüterverkehr unter unterschiedlichen politischen und infrastrukturellen Rahmenannahmen systematisch zu bewerten.

Einordnung im wissenschaftlichen Kontext

Die in Tabelle 39 dargestellte Gegenüberstellung verdeutlicht die methodische Weiterentwicklung des in dieser Arbeit entwickelten Modells im Kontext der bestehenden VECTOR21-Modellfamilie. Während frühere Ansätze, wie jene von Mock (2010) [301], Redelbach (2014) [302] und Kleiner (2020) [11], primär auf kosten- oder nutzenbasierten Entscheidungsmechanismen beruhten, erweitert das vorliegende Modell den methodischen Rahmen um eine systemische Kopplung von Elektrifizierungs-, Automatisierungs- und Infrastrukturaspekten. Darüber hinaus erfolgt die Bewertung der Technologiealternativen nicht mehr ausschließlich auf Basis einer ökonomischen Zielfunktion, sondern über ein hierarchisches Eignungs- und Bewertungssystem, das technische, betriebliche und ökologische Einsatzbedingungen integriert. Damit gelingt eine konsistente Abbildung der technologischen Einsatzfähigkeit und ökonomischen Vorteilhaftigkeit über alle Nutzfahrzeugsegmente hinweg.

Tabelle 39: Gegenüberstellung der wesentlichen Merkmale und Ausprägungen verschiedener Fahrzeugmarktmodelle in der VECTOR21 Software

		VECTOR21 (DLR Institut für Fahrzeugkonzepte)			
Merkmale	**Ausprägungen**	Modellansatz dieser Arbeit	Modellansatz nach Diss. F. Kleiner (2020)	Modellansatz nach Diss. M. Redelbach (2014)	Modellansatz nach Diss. P. Mock (2010)
Technologischer Hintergrund	alternative Kraftstoffe	x			x
	alternative Antriebsstränge	x	x	x	x
	Automatisierungssysteme	**x**			
	Infrastruktur	x			
Fahrzeugsegmente	Pkw			x	x
	LNF, SNF	x	x		
Geographische Eingrenzung	DEU	x	x	x	x
	EU				
Märkte	Neuzulassung	x	x	x	x
	Bestand	x			x
Zeitlicher Rahmen	Simulationsjahr	2050	2040	2040	2040
Szenario	Normativ (Zielszenario)	**x**			
	Explorativ		x	x	x
Modellierung Kaufentscheidung	Kostenbasierter Ansatz	Kostenminimierung inkl. Technologiekombinationen	Kostenminimierung inkl. Effizienztechnologien		Kostenminimierung unter CO2-Restriktion
	Nutzenbasierten Ansatz	Optimierung der Einsatzfähigkeit		Nutzenmaximierung	
	Deterministisch	x	x		x
	stochastisch			x	
Fahrzeugangebot	Fahrzeugkonfiguration dynamisch, Modellintern berechnet	x	x	x	
	Fahrzeugkonfiguration statistisch, Modellextern berechnet				x
Fahrzeug-eigenschaften	TCO	x	x	x	x
	Energieverbrauch	antriebs- und automatisierungsgrad-spezifisch	antriebsstrangspezifisch	antriebsstrangspezifisch	antriebsstrangspezifisch
	CO2-Emissionen TtW	x	x	x	x
	CO2-Emissionen WtW	x			x
	Fahrzeuggewicht	x	x	x	
	Reichweite	x	x	x	
	Ladezeit	x			
	Technologischer Reifegrad	**x**			
	Sicherheitspotential	**x**			
Nutzer-eigenschaften	Jahresfahrleistung	x	x	x	x
	Bestandsalter	x			x
	Fahrprofile	x	x	x	
	Verteilung der Fahrleistung	x	x		
	Agententypen	Flottengröße	Innovationstyp		Innovationstyp
	Haltedauer	x	x	x	x
	Zahlungsbereitschaft			x	
	Wohnort und Einkommen			x	
Restriktion	Infrastrukturverfügbarkeit	x			
	Kompatibilität Kraftstoff und Antrieb	x			
	Fahrzeugmodellverfügbarkeit	x			

8.3 Ausblick

Die in dieser Arbeit entwickelten Simulations- und Bewertungsmodelle bieten eine tragfähige Grundlage für die Analyse technologischer Transformationspfade im Straßengüterkraftverkehr und bieten mehrere Anschlussmöglichkeiten für zukünftige Forschungsarbeiten. Ein wesentlicher Weiterentwicklungsschritt betrifft die Differenzierung der Nutzer- bzw. Einsatzprofile. Aufbauend auf den hier verwendeten Marktdaten nach drei Transportaufgaben könnte eine stärkere Aufschlüsselung nach Wirtschaftszweigen und Haltergruppen erfolgen, um Unterschiede in den technischen Anforderungen und Nutzungsmustern von Nutzfahrzeugen realistischer abzubilden. Ergänzende empirische Erhebungen könnten dabei helfen, branchenspezifische Einsatzbedingungen und Entscheidungskriterien besser zu erfassen.

Darüber hinaus besteht Potenzial zur Vertiefung der technologischen und infrastrukturellen Abbildung. Vertiefte Untersuchungen könnten die Effizienzpotenziale automatisierter und vernetzter Nutzfahrzeuge in Abhängigkeit von Verkehrssituationen und Straßeninfrastrukturausbau definieren. Eine höhere räumliche Auflösung der Energieinfrastrukturverfügbarkeit, beispielsweise auf Basis georeferenzierter Netzdaten, würde zudem eine Bewertung regionaler Unterschiede ermöglichen.

Im Rahmen zukünftiger Analysen sollte zudem untersucht werden, inwieweit die Berücksichtigung unterschiedlicher, neuartiger Finanzierungsansätze wie das Fahrzeug-Leasing oder -Mieten innerhalb der ökonomischen Bewertung von Nutzfahrzeugen dazu beitragen kann, Investitionsbarrieren zu verringern und den Zugang zu Kapital insbesondere für kleinere Unternehmen zu verbessern, beispielsweise auf Basis der in dieser Arbeit abgebildeten differenzierten Agententypen nach Unternehmensgröße.

Darüber hinaus erscheint es sinnvoll, das Potenzial des bi-direktionalen Ladens systematisch zu integrieren. Zukünftige Arbeiten könnten untersuchen, inwieweit Nutzfahrzeuge netzdienliche Leistungen erbringen, Lastspitzen reduzieren oder als mobile Speicher fungieren können. Ergänzend sollten die damit verbundenen Geschäftsmodelle, etwa Vergütungsmechanismen für Flexibilitätsbereitstellung oder Energiehandelsmodelle, analysiert werden, um deren wirtschaftliche Relevanz und Praxistauglichkeit zu bewerten.

Ebenso wäre eine vertiefte Betrachtung der fiskalischen Unterstützung und der gesetzgeberischen Rahmenbedingungen erforderlich. Dies betrifft insbesondere Fördermechanismen, steuerliche Anreize, regulatorische Vorgaben für Energieversorger sowie Zertifizierungs- und Berichtspflichten für Fahrzeughersteller. Eine solche Analyse könnte aufzeigen, wie politische Instrumente die Marktdurchdringung neuer Nutzfahrzeugtechnologien beschleunigen oder hemmen

und welche Anpassungen erforderlich wären, um Planungssicherheit für Unternehmen und Investoren zu schaffen.

Auf makroökonomischer Ebene bietet sich die Weiterentwicklung der Diffusions- und Bestandsmodellierung an. Zukünftige Simulationen sollten Diffusionspfade für Automatisierung im Straßengüterkraftverkehr nicht ausschließlich als inkrementelle, sondern auch als potenziell disruptive Entwicklung in entsprechenden normativen Szenarien modellieren, um veränderte und neue Einsatzprofile sowie mögliche Rebound-Effekte infolge steigender oder fallender Fahrleistungen angemessen abbilden zu können.

Zudem wäre eine Erweiterung des Modellrahmens auf den europäischen Nutzfahrzeugmarkt sowie eine Kopplung mit Energiesystemmodellen von Vorteil. Dadurch könnten gegenseitige Rückwirkungen zwischen der Energiewende und der Verkehrstransformation systematisch untersucht und näher quantifiziert werden.

9 Literaturverzeichnis

[1] Umweltbundesamt 2020 *Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA): Microsoft Access-Datenbankanwendung Version 4.2* (Umweltbundesamt)

[2] Umweltbundesamt 2022 *TREMOD Simulationsmodell Version 6.0: Daten für das DLR* (Umweltbundesamt)

[3] Deutschlandinzahlen *Güterverkehr in Tonnenkilometern - in Mrd. (Tonnenkilometern): Tabelle* https://www.deutschlandinzahlen.de/tab/deutschland/infrastruktur/verkehr-und-transport/gueterverkehr-in-tonnenkilometern

[4] Umweltbundesamt 2021 *Emissionen des Verkehrs: Umweltzustand und Trends, Verkehr* https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#pkw-fahren-heute-klima-und-umweltvertraglicher

[5] Forschungs-Informations-System 2021 *Strukturelle Rahmenbedingungen des Güterverkehrs: Grundlagen des Güterverkehrs* (accessed 26 Sep 2022)

[6] BMDV 2023 *Gleitende Langfrist-Verkehrsprognose 2021-2022: Im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr* (Berlin: BMDV)

[7] BMUV 2022 *Bundes-Klimaschutzgesetz* (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz)

[8] European Commission 2023 *Regulation (EU) 2023/851 of the European Parliament and of the Council of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2019/631 as regards strengthening the CO2 emission performance standards for new passenger cars and new light commercial vehicles in line with the Union's increased climate ambition: L 110/5 (*vol 2023*)*

[9] Europäischen Union 2019 *VERORDNUNG (EU) 2019/2144 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES: L 325/1*

[10] Bundesamt für Güterverkehr 2019 *Marktbeobachtung Güterverkehr: Auswertung der Arbeitsbedingungen in Güterverkehr und Logistik 2019-I -Fahrerberufe-* (Bundesamt für Güterverkehr)

[11] Florian Kleiner 2021 *Nutzfahrzeugkonzepte der Zukunft: Systemische Technologiebewertung konkurrierender Antriebskonzepte: Dissertation* (Stuttgart: DLR-FK)

[12] Andrew Burnham *et al* 2021 *Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains: ANL/ESD-21/4* (Energy Systems Division)

[13] Julius Jöhrens, Michel Allekotte, Florian Heining, Hinrich Helms, Dominik Räder, Nadine Köllermeier and Volker Waßmuth 2022 *Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030: Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads"* (ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH)

[14] Heike Flämig, Patrick Fieltsch, Ulrich Müller-Steinfahrt and Christian Kille 2021 *Use Cases für klimafreundliche Nutzfahrzeuge: Wissenschaftliche Beratung und Begleitung des BMVI zur Weiterentwicklung der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS)* (Technische Universität Hamburg)

[15] Prof. Dr. Martin Wietschel, Dr. Till Gnann, André Kühn, Dr. Patrick Plötz, Cornelius Moll, Daniel Speth, Jan Buch and Dr. Tobias Boßmann 2017 *Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw:*

Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (Karlsruhe: Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Transport Consult GmbH, TU Hamburg-Harburg – IUE and M-Five)

[16] Till Gnann *et al* 2017 *„Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential"* (Karlsruhe: Fraunhofer ISI F I)

[17] Bernd Propfe 2016 *Marktpotentiale elektrifizierter Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung von technischen, politischen und ökonomischen Randbedingungen: Dissertation* (Stuttgart: Uni Stuttgart)

[18] Schade W *et al* 2023 *Gestaltung des MKS-Referenzszenarios für die Periode 2022 bis 2050 (REF-2050)*

[19] Jingyuan Zhao, Andrew F. Burke, Marshall R. Miller and Lewis M. Fulton 2024 Vehicle choice modeling for emerging zero-emission medium- and heavy-duty vehicle markets in California *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* **26** 101169

[20] Verbundvorhaben BEniVer 2023 *Roadmap für strombasierte Kraftstoffe: Gesamtbericht zur Begleitforschung Energiewende im Verkehr (BEniVer)* (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.)

[21] Martin Wietschel et al. 2019 *Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw: Endbericht* (Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI)

[22] Bessie Noll, Santiago del Val, Tobias S. Schmidt and Bjarne Steffen 2022 Analyzing the competitiveness of low-carbon drive-technologies in road-freight: A total cost of ownership analysis in Europe *Applied Energy* **306** 118079

[23] Florian Kleiner, Horst E. Friedrich 2017 Development of a Transport Application based Cost Model for the assessment of future commercial vehicle concepts *European Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Congress*

[24] Lebeau P, Macharis C and van Mierlo J 2019 How to Improve the Total Cost of Ownership of Electric Vehicles: An Analysis of the Light Commercial Vehicle Segment *World Electric Vehicle Journal* **10**

[25] European Commission 2019 *REGULATION (EU) 2019/1242 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL setting CO2 emission performance standards for new heavy-duty vehicles and amending Regulations (EC) No 595/2009 and (EU) 2018/956 of the European Parliament and of the Council and Council Directive 96/53/EC*

[26] Rogers E M 2003 *Diffusion of innovations (Social science)* (New York, London, Toronto, Sydney: Free Press)

[27] Schmidt S 2009 *Die Diffusion komplexer Produkte und Systeme: Ein systemdynamischer Ansatz (SpringerLink Bücher)* (Wiesbaden: Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden)

[28] Michael Fries, Mathias Kerler, Stephan Rohr, Stephan Schickram, Michael Sinning and Markus Lienkamp 2017 *An Overview of Costs for Vehicle Components, Fuels, Greenhouse Gas Emissions and Total Cost of Ownership Update 2017* (Institute of Automotive Technology)

[29] ifeu 2020 *Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990- 2018): TREMOD (Transport Emission Model)* (Umweltbundesamt)

[30] Luderer G, Kost C and Sörgel D 2021 *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich*

[31] Dr. Katharina Göckeler, Inia Steinbach, Wolf Kristian Görz, Florian Hacker, Ruth Blanck and Moritz Mottschall 2023 *StratES - Szenarien für die Elektrifizierung des Straßengüterverkehrs: Studie auf Basis von Markthochlaufmodellierungen* (Berlin: Öko-Institut e.V.)
[32] Annelis K. Breed, Daniel Speth and Patrick Plötz 2021 CO2 fleet regulation and the future market diffusion of zero-emission trucks in Europe *Energy Policy* **159** 112640
[33] Brian Bush, Matteo Muratori and Chad Hunter, Jarett Zuboy, and Marc Melaina 2019 *Scenario Evaluation and Regionalization Analysis (SERA) Model: Demand Side and Refueling Infrastructure Buildout: NREL/TP-5400-70090* (NREL)
[34] Philipp Kluschke, Till Gnann, Patrick Plötz and Martin Wietschel 2019 Market diffusion of alternative fuels and powertrains in heavy-duty vehicles: A literature review *Energy Reports* **5** 1010–24
[35] Benjamin Kickhöfer and Jens Brokate 2017 Die Entwicklung des deutschen Pkw-Bestandes: Ein Vergleich bestehender Modelle und die Vorstellung eines evolutionären Simulationsansatzes *Zeitschrift für Verkehrswissenschaft* **2017**
[36] Flämig H, Lunkeit S, Fieltsch P, Müller S, Thaller C, Liedtke G, Voigtländer F and Janke C 2020 *ATLaS - Automatisiertes und vernetztes Fahren in der Logistik - Chancen für mehr Wertschöpfung : Projektbericht des Verbundvorhabens, ATLaS - Automated and connected driving in logistics* (Hamburg: Technische Universität Hamburg, Institut für Verkehrsplanung und Logistik , Institut für Verkehrsforschung, Berlin)
[37] Siroki S, Nyerges Á and Tihanyi V 2019 A review of automated vehicle systems *2019 International IEEE Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE)* pp 109–14
[38] Dr. Michael Krail 2019 *Energie-und Treibhausgaswirkungen desautomatisierten und vernetztenFahrensim Straßenverkehr: Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts-und Kraftstoffstrategie* (Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung)
[39] T.S. Stephens, J. Gonder and Y. Chen, Z. Lin and C. Liu and D. Gohlke 2016 *Estimated Bounds and Important Factors for Fuel Use and Consumer Costs of Connected and Automated Vehicles (*DE-AC36-08GO28308*)* (Denver West Parkway: NREL)
[40] Vasebi S, Hayeri Y M, Samaras C and Hendrickson C 2018 Low-Level Automated Light-Duty Vehicle Technologies Provide Opportunities to Reduce Fuel Consumption *Transportation Research Record* **2672** 60–74
[41] He Y, Makridis M, Fontaras G, Mattas K, Xu H and Ciuffo B 2020 The energy impact of adaptive cruise control in real-world highway multiple-car-following scenarios *European Transport Research Review* **12** 17
[42] Pampel S, Jamson S, Hibberd D and Barnard Y 2020 ACC design for safety and fuel efficiency: the acceptance of safety margins when adopting different driving styles *Cognition, Technology & Work* **22** 335–42
[43] Thomas Hummel, Matthias Kühn, Jenö Bende and Antje Lang *Fahrerassistenzsysteme: Ermittlung des Sicherheitspotenzials auf Basis des Schadengeschehens der Deutschen Versicherer* (Unfallforschung der Versicherer)

[44] Lee S, Cho K, Park H and Cho D 2023 Cost-Effectiveness of Introducing Autonomous Trucks: From the Perspective of the Total Cost of Operation in Logistics *Applied Sciences* **13**
[45] Zia Wadud and Giulio Mattioli 2021 Fully automated vehicles: A cost-based analysis of the share of ownership and mobility services, and its socio-economic determinants *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **151** 228–44
[46] Albin Engholm, Anna Pernestål and Ida Kristoffersson 2020 Cost Analysis of Driverless Truck Operations *Transportation Research Record* **2674** 511–24
[47] Sven Altenburg, Hans-Paul Kienzler and Alex Auf der Maur 2018 *Einführung von Automatisierungsfunktionen in der Pkw-Flotte: Auswirkungen auf Bestand und Sicherheit* (Prognos AG)
[48] Dr. Jörg Adolf 2016 *DIESEL ODER ALTERNATIVE ANTRIEBE – WOMIT FAHREN LKW UND BUS MORGEN?: Fakten, Trends und Perspektiven bis 2040* (Hamburg: Shell)
[49] KBA 2022 *Kraftverkehr: Verkehr deutscher Lastkraftfahrzeuge: Statistiken* https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/fahrzeuge_node.html (accessed 15 Jul 2022)
[50] KBA 2022 *Kraftverkehr: Verkehr europäischer Lastkraftfahrzeuge: Statistiken* https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/europaeischerLastkraftfahrzeuge/verkehreurop%C3%A4ischer_node.html (accessed 15 Jul 2022)
[51] Europäischen Union 2018 *VERORDNUNG (EU) 2018/858 über die Genehmigung und die Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 715/2007 und (EG) Nr. 595/2009 und zur Aufhebung der Richtlinie 2007/46/EG: L 151/1 (*vol 2018*)*
[52] Kraftfahrtbundesamt 2022 *KBA Webseite Glossar* https://www.kba.de/DE/Service/Glossar1/glossar_node.html;jsessionid=7627B2DD8111AA8A265D3E6812FE26EC.live21323 (accessed 16 Jan 2022)
[53] KBA 2022 *Bekanntmachung zur Fahrzeugsystematik (SV 1): Kraftfahrt-Bundesamt* (Kraftfahrtbundesamt)
[54] Bundesminiserium der Justiz 2022 *Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO)* https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/index.html#BJNR067910012BJNE016900119 (accessed 19 Jul 2022)
[55] Bußgeldkatalog 2022 *Lkw-Führerscheinklassen: Übersicht zur Fahrerlaubnis für jede Art von Brummi* https://www.bussgeldkatalog.org/lkw-fuehrerscheinklassen/#:~:text=Nach%20der%20Umstellung%20auf%20den,%2C%20C1E%2C%20C%20und%20CE. (accessed 19 Jul 2022)
[56] Hoepke E and Breuer S (eds) 2016 *Nutzfahrzeugtechnik: Grundlagen, Systeme, Komponenten (ATZ/MTZ-Fachbuch)* 8th edn (Wiesbaden: Springer Vieweg)
[57] KBA 2022 *Statistik - Fahrzeuge: Neuzulassungen, Bestand, Besitzumschreibungen, Außerbetriebssetzungen, Fahrzeuguntersuchungen* https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/fahrzeuge_node.html (accessed 15 Jul 2022)
[58] Özcan Deniz 2021 *Projekt EVER Meilensteinbericht 10: Energieträgermodul und Fahrzeugmarktmodellierung: AP2100* (Stuttgart: DLR)

[59] KBA 2020 *Sonderauswertung aus der Neuzulassungs- und Bestandsstatistik 2008-2018* (Kraftfahrtbundesamt)
[60] Marcus Bäumer, Heinz Hautzinger, Manfred Pfeiffer, Wilfried Stock, Barbara Lenz, Tobias Kuhnimhof and Katja Köhler 2017 *Fahrleistungserhebung 2014 - Inländerfahrleistung*
[61] KBA 2022 *Kraftverkehr: Verkehr in Kilometern: Statistiken* https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/verkehr_in_kilometern_node.html (accessed 15 Jul 2022)
[62] trans.info 2022 Löhne der polnischen LKW-Fahrer sind um ein Drittel gestiegen! Erstaunlicherweise zahlt sich Berufserfahrung nicht aus
[63] ACEA 2022 *Vehicles in use, Europe 2022: Report* (ACEA)
[64] S. Lu 2006 *Vehicle Survivability and Travel Mileage Schedules: Technola Report* (National Highway Traffic Safety Administration)
[65] Laux H, Gillenkirch R M and Schenk-Mathes H Y 2018 *Entscheidungstheorie (Lehrbuch)* 10th edn (Berlin, Heidelberg: Springer Gabler)
[66] Dr. Katharina Göckeler, Florian Hacker, Lukas Ziegler, Jonas Heinzelmann, Leonie Lesemann and Prof. Dr. Tobias Bernecker 24.02.22 *Anforderungen der Logistikbranche an einen Umstieg auf klimaschonende Fahrzeugtechnologien: Ergebnisbericht einer standardisierten Befragung* (Berlin: Öko-Institut e.V.)
[67] Michelle Vetter 2020 Einfluss der Sicherheit auf die Kaufentscheidung von automatisierten Fahrsystemen im LKW-Markt *Masterarbeit* Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, University of Applied Sciences Darmstadt
[68] Continental 2021 *Nutzfahrzeugstudie „Der vernetzte Truck“ 2021: Ergebnisse einer Unternehmensbefragung bei Transportfirmen, Logistikern und Spediteuren* (INFAS)
[69] Aberle G 2003 *Transportwirtschaft: Einzelwirtschaftliche und gesamtwirtschaftliche Grundlagen (Wolls Lehr- und Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften)* 4th edn (München, Wien: Oldenbourg)
[70] Xavier Mosquet, Thomas Dauner, Nikolaus Lang, Michael Rüßmann, Rakshita Agrawal, Florian Schmieg and Antonella Mei-Pochtler 2015 *Revolution in the Driver’s Seat: The Road to Autonomous Vehicles* https://www.bcg.com/publications/2015/automotive-consumer-insight-revolution-drivers-seat-road-autonomous-vehicles (accessed 11 Apr 2023)
[71] LOHRE D and HERSCHLEIN S 2010 *Grüne Logistik: Studie zu Begriffsverständnis, Bedeutung und Verbreitung „Grüner Logis-tik“ in der Speditions- und Logistikbranche* (Bonn: Hochschulle Heilbronn)
[72] SARA ROGERSON 2013 *Purchasing process for freight transport services and influence on CO2 emissions: THESIS FOR THE DEGREE OF LICENTIATE OF ENGINEERING* (Gothenburg, Sweden: CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY)
[73] Sarah Pfoser, Gerald Aschauer, Laura Simmer and Oliver Schauer 2016 Facilitating the implementation of LNG as an alternative fuel technology in landlocked Europe: A study from Austria *Research in Transportation Business & Management* **18** 77–84
[74] DEKRA Automobil 2020 *Fahrzeug - Selbstkostenberechnung* (DEKRA Automobil GmbH)
[75] DAT 2019 *DAT-Marktspiegel LKW & Transporter 2018/2019: Daten- und Informationssystem SilverDAT II* (Deutsche Automobil Treuhand)

[76] Raedt H-W, Wilke F and Ernst C-S 2016 Initiative Massiver Leichtbau Phase II: Leichtbaupotenziale für ein leichtes Nutzfahrzeug *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* **118** 50–3
[77] Nikolas Hill, John Norris, Felix Kirsch, Craig Dun, Neil McGregor, Enrico Pastori, Ian Skinner 2015 *Light weighting as a means of improving Heavy Duty Vehicles' energy efficiency and overall CO2 emissions: Heavy Duty Vehicles Framework Contract –Service Request 2 (*CLIMA.C.2/FRA/2013/0007ED 59243*)* (European Commission, DG Climate Action)
[78] Pischinger S and Seiffert U (eds) 2021 *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik (ATZ/MTZ-Fachbuch)* 9th edn (Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg)
[79] European Union 2016 *ACTS ADOPTED BY BODIES CREATED BY INTERNATIONAL AGREEMENTS: Regulation No 117 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UNECE)*
[80] Thorsten Frank 2012 *Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen: Stand des Wissens* (Berlin)
[81] Frank Dünnebeil, Carsten Reinhard, Udo Lambrecht, Antonius Kies, Stefan Hausberger and Martin Rexeis 2015 *Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasminderung bei schweren Nutzfahrzeugen: TEXTE 32/2015* (Dessau-Roßlau)
[82] Hussein Basma, Arash Saboori and Felipe Rodríguez 2021 *TOTAL COST OF OWNERSHIP FOR TRACTOR-TRAILERS IN EUROPE: BATTERY ELECTRIC VERSUS DIESEL* (ICCT)
[83] Dipl.-Ing. Maximilian KLOESS, Dr Peter PRENNINGER, Dr Arno HUSS, Dipl.-Ing. Kurt KÖNIGHOFER, Dipl.-Ing. Lorenza CANELLA and Prof. Dr Reinhard HAAS 2011 *Potenziale effizienter Nutzfahrzeugantriebe für einen nachhaltigen Straßengüterverkehr bis 2050: Eine Studie finanziert im Rahmen der 2. Ausschreibung der Programmlinie a3plus des Forschungs- und Technologieprogramms iv2splus* (Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie Auftragnehmer)
[84] Ben Sharpe and Hussein Basma 2022 *A meta-study of purchase costs for zero-emission trucks: Working Paper* (Berlin: ICCT)
[85] partsbit.de *KFZ-Ersatzteile Online Marktplatz: Gebrauchte Fahrerhäuser* https://www.partsbit.de/
[86] van Basshuysen R and Schäfer F (eds) 2017 *Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven (SpringerLink Bücher)* 8th edn (Wiesbaden: Springer Vieweg)
[87] en2x 2022 *Statistik*
[88] Hubertus Bardt 2012 *Was erklärt die Kraftstoffpreisentwicklung?*
[89] Verordnung über die Beschaffenheit und die Auszeichnung der Qualitäten von Kraft- und Brennstoffen - 10. BImSchV 2010 *10. BImSchV*
[90] Prussi, M., Yugo, M., De Prada, L., Padella, M. and Edwards, R. 2020 *JEC Well-To-Wheels report v5* (Luxembourg: Publications Office of the European Union)
[91] NPM 2019 *ELEKTROMOBILITÄT. BRENNSTOFFZELLE. ALTERNATIVE KRAFTSTOFFE – EINSATZMÖGLICHKEITEN AUS TECHNOLOGISCHER SICHT: 1. KURZBERICHT DER AG 2 ALTERNATIVE ANTRIEBE UND KRAFTSTOFFE FÜR NACHHALTIGE MOBILITÄT*

[92] Preuß, J., Munch, K. und Denbratt, I. 2018 *Performance and emissions of long-chain alcohols as drop-in fuels for heavy duty compression ignition engines. Fuel, (*890-897*)*
[93] Engman, A., Hartikka, T., Honkanen, M., Kiiski, U., Kuronen, M., Lehto, K., Mikkonen, S., Nortio, J., Nuottimäki, J. und Saikkonen, P 2016 *Neste Renewable Diesel Handbuch* (Espoo: Neste Corporation)
[94] Deutscher Bundestag 2018 *E-Fuels: Dokumentation (*WD 5 - 3000 - 008/18*)* (WD 5: Wirtschaft und Verkehr and Ernährung, Landwirtschaft und)
[95] Dena 2025 *Chancen und Risiken von HVO100 im Schwerlastverkehr: Marktanalyse, Nachhaltigkeit und zukünftige Nutzungsperspektiven des erneuerbaren Dieselkraftstoffs HVO100* (Dena)
[96] Maus W (ed) 2019 *Zukünftige Kraftstoffe: Energiewende des Transports als ein weltweites Klimaziel (ATZ/MTZ-Fachbuch)* (Berlin: Springer Vieweg)
[97] ADAC e. V 2025 *XTL, HVO-Diesel & Co.: Was steckt hinter den neuen Kraftstoffen?*
[98] Royal Society 2019 *Sustainable synthetic carbon based fuels for transport*
[99] Dr. Ulrich Kramer 2020 *Defossilisierung des Transportsektors: Optionen und Voraussetzungen in Deutschland* (Ford-Werke GmbH)
[100] Dr. Jens Perner, Dr. Michaela Unteutsch, Andrea Lövenich 2018 *Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe: Studie (*129/04-S-2018/DE*)* (Berlin: Agora Energiewende)
[101] Stefan Siegemund, Marcus Trommler, Ole Kolb, Valentin Zinnecker, Patrick Schmidt, Werner Weindorf, Dr. Werner Zittel and Jan Zerhusen 2017 *The potential of electricity-based fuels for low-emission transport in the EU: An expertise by LBST and dena «E-FUELS» STUDY* (Berlin: Dena)
[102] Prognos 2018 *STATUS UND PERSPEKTIVEN FLÜSSIGER ENERGIETRÄGER IN DER ENERGIEWENDE: Eine Studie der Prognos AG, des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT und des Deutschen Biomasseforschungszentrums DBFZ* (Prognos)
[103] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2019 *Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan* (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie)
[104] Sven Kreidelmeyer, Hans Dambeck, Dr. Almut Kirchner and Marco Wünsch 2020 *Kosten und Transformationspfade für strombasierte Energieträger: Endbericht zum Projekt „Transformationspfade und regulatorischer Rahmen für synthetische Brennstoffe“* (Basel: Prognos AG)
[105] Moritz Mottschall, Peter Kasten, Sven Kühnel and Lukas Minnich 2019 *Sensitivitäten zur Bewertung der Kosten verschiedener Energieversorgungsoptionen des Verkehrs bis zum Jahr 2050: Abschlussbericht (*110850*)* (Dessau-Roßlau: Umweltbundesamtes)
[106] Simon Pichlmaier, Tobias Hübner, Stephan Kigle 2019 *Welche strombasierten Kraftstoffe sind im zukünftigen Energiesystem relevant?* https://www.ffe.de/veroeffentlichungen/welche-strombasierten-kraftstoffe-sind-im-zukuenftigen-energiesystem-relevant/
[107] Matthias Deutsch and Urs Maier 2018 *The Future Cost of Electricity-Based Synthetic Fuels: Study* (Berlin: AGORA)
[108] Véronique Dias, Maxime Pochet, Francesco Contino and and Hervé Jeanmart 2020 *Energy and Economic Costs of Chemical Storage* (Belgium: Frontiers)

[109] Jürgen Sutter and Cornelia Merz 2019 *Ökobilanz der Herstellung und Nutzung von Oxymethylenether (OME): Abschlussbericht im im Verbundprojekt P2X: Erforschung, Validierung und Implementierung von „Power-to-X" Konzepten* (Darmstadt: Öko-Institut e.V.)
[110] Prof. Dr. techn. Christian Beidl, Markus Münz and Alexander Mokros 2018 *OME – Ein Kraftstoff für den Dieselmotor der Zukunft?: Kraftstoffe für die Mobilität von morgen* (Braunschweig: Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe)
[111] Thomas Bierkandt, Michael Severin, Simone Ehrenberger and Markus Köhler 2018 *Klimaneutrale synthetische Kraftstoffe im Verkehr: Potenziale und Handlungsempfehlungen* (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)
[112] Markus Zubel, Benedigt Heuser and Stefan Pischinger 2017 *1-Oktanol: Maßgeschneiderter Kraftstoff für geringe Rußemissionen* (MTZ Zeitschrift)
[113] Schemme S, Breuer J L, Köller M, Meschede S, Walman F, Samsun R C, Peters R and Stolten D 2020 H2-based synthetic fuels: A techno-economic comparison of alcohol, ether and hydrocarbon production *International Journal of Hydrogen Energy* **45** 5395–414
[114] Breuer J L, Scholten J, Koj J C, Schorn F, Fiebrandt M, Samsun R C, Albus R, Görner K, Stolten D and Peters R 2022 An Overview of Promising Alternative Fuels for Road, Rail, Air, and Inland Waterway Transport in Germany *Energies* **15**
[115] gibgas.de 2022 *BioCNG: Die Zukunft fährt klimaneutral* https://www.gibgas.de/Wissen/BioCNG?id=4
[116] Dr. Dietrich Gerstein and Frederik Brandes 2020 *LNG kann Grün!: Erneuerbares LNG – LRG (Liquefied Renewable Gas)* (Bonn: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.)
[117] Dr. Ulrich Bünger, Hubert Landinger, Werner Weindorf, Reinhold Wurster, Jan Zerhusen and Dr. Werner Zittel 2016 *VERGLEICH VON CNG UND LNG ZUM EINSATZ IN LKW IM FERNVERKEHR: EINE EXPERTISE FÜR DIE OPEN GRID EUROPE GMBH | ABSCHLUSSBERICHT* (Ludwig Bölkow Systemtechnik)
[118] Prussi M, Yugo M, De Prada L, Padella M, Edwards R and Lonza L JEC Well-to-Tank report v5 *1831-9424*
[119] Maximilian Heneka, Wolfgang Köppel, Dr. Frank Graf, onny Erler, Nico Steyer and Enrico Schuhmann 2021 *Roadmap für die kurzfristige Umsetzung des Greenings von LNG und CNG* (DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut)
[120] Dr. Dietrich Gerstein and Armin Bollien 2021 *Fact Sheet BioLNG: BioLNG Mengenpotenziale und regulatorischer Rahmen für den Markthochlauf von BioLNG als Kraftstoff für schwere Lkw* (Dena)
[121] Umweltbundesamt 2022 *Verkehr: Daten› Umweltzustand und Trends›Verkehr* https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr (accessed 7 Jul 2022)
[122] Isabel Schrems and Peter Wieland 2021 *Gesellschaftliche Kosten von Kohlestrom heute bis zu dreimal so teuer wie Kosten von Strom aus erneuerbaren Energien* (Forum Ökologische-Soziale Marktwirtschaft)
[123] Dr. Christoph Kost 2021 *Stromgestehungskosten erneuerbare Energien* (Fraunhofer ISE)
[124] Destatis 2023 *Daten zur Energiepreisentwicklung: Preise* (Statistisches Bundesamt)

[125] NPM 2021 *Ladeinfrastruktur für batterieelektrische LKW: AG 5* (Nationale Plattform Zukunft der Mobilität)
[126] European Commission 2022 *Electric vehicle recharging prices: European Alternative Fuels Observatory* (European Commission)
[127] Milence 2025 *Standardtarif von Milence*
[128] Philipp Rose, Martin Wietschel and Till Gnann 2020 *Wie könnte ein Tankstellenaufbau für Brennstoffzellen-Lkw in Deutschland aussehen?: Working Paper Sustainability and Innovation* (Fraunhofer ISI)
[129] Statistisches Bundesamt 2019 Güterverkehr: www.destatis.de
[130] Teichert O, Link S, Schneider J, Wolff S and Lienkamp M 2023 Techno-economic cell selection for battery-electric long-haul trucks **16** https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/434450
[131] NOW GmbH 2021 *FÖRMLICHE VORABBEKANNTMACHUNG DER AUSSCHREIBUNG DES DEUTSCHLANDNETZES: Deutschlandnetz* (NOW GmbH)
[132] Frank Merten A S 2023 *Metaanalyse zu Wasserstoffkosten und -bedarfen für die CO2-neutrale Transformation: Studie für den Landesverband Erneuerbare Energien NRW e.V. (LEE NRW)* (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH)
[133] Jan Zerhusen, Hubert Landinger, Yanni Astono, Mathias Böhm, Johannes Pagenkopf and Florian Heckert 2023 *H2-Infrastruktur für Nutzfahrzeuge im Fernverkehr: Aktueller Entwicklungsstand und Perspektiven* (e-mobil Bw GmbH)
[134] Gregor Brändle, Max Schönfisch and Simon Schulte 2020 *Estimating Long-Term Global Supply Costs for Low-Carbon Hydrogen: EWI Working Paper, No 20/04* (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln gGmbH)
[135] Thomas Mayer 2020 *Modellbasierte Analyse und Optimierung von Wasserstoffprozessketten für Brennstoffzellen-PKWs in Deutschland: Dissertation* (München: Technische Universität München)
[136] H2 Mobility 2022 *Wasserstoff für Busse und Trucks – Fortschritt tanken mit H2 MOBILITY: Vortrag auf Conference Days 2023 - Truck & Bus* (Huss Verlag)
[137] Braess H-H and Seiffert U (eds) 2013 *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik (ATZ/MTZ-Fachbuch)* 7th edn (Wiesbaden: Springer Vieweg)
[138] Steve Mathison 2020 *How Advanced Hydrogen Fueling Protocols can Improve Fueling Performance & H2 Station Design: Hydrogen Production, Power, and Storage Center for Integrated Mobility Services* (NREL)
[139] Reif K (ed) 2010 *Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe: Mit Brennstoffzellen und alternativen Kraftstoffen ; mit 247 Abbildungen (Bosch Fachinformation Automobil)* 1st edn (Wiesbaden: Vieweg + Teubner)
[140] NREL 2021 *Market Segmentation Analysis of Medium and Heavy Duty Trucks with a Fuel Cell Emphasis (Project ID SA169)* (2021 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting: DOE Hydrogen Program)
[141] Advanced Propulsion Centre UK 2022 *Technology Roadmaps* https://www.apcuk.co.uk/media-type/roadmaps/ (accessed 1 Dec 2022)
[142] Kurek R 2006 *Nutzfahrzeug-Dieselmotoren: Stand der Technik – Entwicklungs- und Innovationspotenziale – Optimierungspotenziale (Fahrzeugtechnik)* 1st edn (s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag)
[143] ICCT 2021 *ICCT's COMMENTS AND TECHNICAL RECOMMENDATIONS ON FUTURE EURO 7/VII EMISSION STANDARDS* (Berlin: ICCT)

[144] ADAC 2022 *ADAC Position zur Fortschreibung der Pkw-Abgasnorm post Euro 6: ADAC Position zur Fortschreibung der Pkw-Abgasnorm post Euro 6* (München)
[145] P. Dilara 2022 *Euro 7 emission standard: development: AECC Workshop* (Brüssel: Europäische Kommission)
[146] Kasper R and Schuenemann M 2012 *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. 5. Elektrische Fahrantriebe. Topologien und Wirkungsgrad (73* 10*)* (Wiesbaden: Springer Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH)
[147] Pierre Steffen 2023 *Der Wasserstoffmotor als moderne und effiziente Antriebstechnologie für Nutzfahrzeuge: Conference Days 2023 - Truck & Bus - Paneldiskussion* (Online: KEYOU GmbH)
[148] Michael Schrank 2021 *WASSERSTOFFVERBRENNUNGSMOTOR ALS ALTERNATIVER ANTRIEB: Metastudie* (NOW GmbH)
[149] Klell M, Eichlseder H and Trattner A 2018 *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik: Erzeugung, Speicherung, Anwendung (ATZ/MTZ-Fachbuch)* 4th edn (Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg)
[150] Kerstin Mayr, Dr. Franz Hofer, Gilbert Ragowsky, Wolfgang Gruber, Dipl.-Ing. Anton Arnberger, Dr. Alexander Kabza, Patrick Wolf, Maike Schmidt and Dr. Ludwig Jörissen 2021 *Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug: Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte* (Stuttgart: e-mobil BW GmbH – Landesagentur für neue)
[151] Daniel Thomas Koch, Enno Eßer, Sven Kureti and Alvaro Sousa H2-DeNOx-Katalysator für H2-Verbrennungsmotoren *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* **6/2020**
[152] Tschöke H (ed) 2014 *Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs: Basiswissen (ATZ/MTZ-Fachbuch Ser)* (Wiesbaden: Springer Vieweg)
[153] ATZ 2021 *HEAVY-DUTY, ON- AND OFF-HIGHWAY ENGINES 2021: Conference Proceedings* (online, Webinar: ATZ live)
[154] Russ Zukouski 2022 *Navistar SuperTruck II: Development and Demonstration of a Fuel-Efficient Class 8 Tractor & Trailer* (US: DOE 2020 ANNUAL MERIT REVIEW)
[155] Patrick Schäfer 2020 Lkw-Dieselmotor von Weichai mit Wirkungsgrad von 50 Prozent *Springer Professional*
[156] Ivan Mareev 2018 *Analyse und Bewertung von batteriegetriebenen, oberleitungsversorgten und brennstoffzellengetriebenen Lastkraftwagen für den Einsatz im Güterfernverkehr in Deutschland: Dissertation (*Band 125*)* (Aachen: RWTH Aachen Universtiät)
[157] Dan Meszler, Oscar Delgado, Felipe Rodríguez and Rachel Muncrief 2018 *EUROPEAN HEAVY-DUTY VEHICLES: COST-EFFECTIVENESS OF FUELEFFICIENCY TECHNOLOGIES FOR LONG-HAUL TRACTOR-TRAILERS IN THE 2025–2030 TIMEFRAME: White Paper* (International Councul on Clean Transportation)
[158] Rosen P A Beitrag zur Optimierung von Wasserstoffdruckbehältern *Dissertation*
[159] R. Wurster, W. Weindorf, W. Zittel, P. Schmidt, C. Heidt U L, A. Lischke and Dr. S. Müller 2014 *LNG as an alternative fuel for the operation of ships and heavy-duty vehicles: scientific supervision, support and guidance of the BMVI in the sectors Transport and Mobility with a specific focus on fuels and propulsion*

technologies, as well as energy and climate (Munich/Ottobrunn, Heidelberg, Berlin: BMDV)
[160] U.S. Department of Energy 2020 *DOE Hydrogen and Fuel Cells Program: 2019 Annual Progress Report; DOE/GO-102020-5257* (U.S. Department of Energy)
[161] Brian D. James, Cassidy Houchins, Jennie M. Huya-Kouadio and Daniel A. DeSantis 2016 *Final Report: Hydrogen Storage System Cost Analysis* (USA: Strategic Analysis Inc.)
[162] Kevin Chandler, Paul Norton and Nigel Clark 2000 *RALEY'S LNG TRUCK FLEET: FINAL RESULTS: Alternative Fuel Truck Evaluation Project* (Oak Ridge)
[163] C. Hebling, M. Ragwitz, T. Fleiter, U. Groos, D. Härle A H, M. Jahn and N. Müller 2019 *Eine Wasserstoff-Roadmap für Deutschland* (Karlsruhe und Freiburg: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe)
[164] ZVEI 2013 *Spannungsklassen in der Elektromobilität* (Frankfurt am Main: Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie)
[165] Kampker A, Vallée D and Schnettler A (eds) 2018 *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie* 2nd edn (Berlin: Springer Vieweg)
[166] Naunheimer H, Bertsche B, Ryborz J, Novak W and Fietkau P 2019 *Fahrzeuggetriebe: Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion* 3rd edn (Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg)
[167] Dar A R, Haque A, Khan M A, Kurukuru V S B and Mehfuz S 2024 On-Board Chargers for Electric Vehicles: A Comprehensive Performance and Efficiency Review *Energies* **17**
[168] U.S. DRIVE 2017 *Electrical and Electronics Technical Team Roadmap* (U.S. DRIVE Partnership)
[169] Markus Bauer 2018 Achsantrieb versus Zentralantrieb: Elektrische Antriebe im Nutzfahrzeug
[170] Fraunhofer IPT/WZL 2022 *Technologischer Deep-Dive | Die Bipolarplatte der PEM-Brennstoffzelle* (NOW GmbH)
[171] Jennie Huya-Kouadio, Brian D. James June 6th, 2023 *Fuel Cell Cost and Performance Analysis: Presentation for the DOE Hydrogen Program* (DOE Hydrogen Program)
[172] David Smith, Ron Graves, Burak Ozpineci and P. T. Jones 2019 *Medium- and Heavy-Duty Vehicle Electrification: An Assessment of Technology and Knowledge Gaps* (Oak Ridge National Laboratory (ORNL) and National Renewable Energy Laboratory)
[173] Wolff S, Fries M and Lienkamp M 2020 Technoecological analysis of energy carriers for long-haul transportation *Journal of Industrial Ecology* **24** 165–77
[174] Brian James 2018 *2018 Cost Projections of PEM Fuel Cell Systems for Automobiles and Medium-Duty Vehicles: Fuel Cell Technologies Office Webinar* (US: U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy)
[175] Ferdinand Überall 2021 *Untersuchung unterschiedlicher Spannungsebenen in Kraftfahrzeugen* (TU Hochschule Ingolstadt)
[176] BloombergNEF 2021 *BNEF 2019 Lithium-ion battery price survey* (BloombergNEF)
[177] Mauler L, Duffner F, Zeier W G and Leker J 2021 Battery cost forecasting: a review of methods and results with an outlook to 2050 *Energy Environ. Sci.* **14** 4712–39

[178] Dr. Axel Thielmann, Andreas Sauer and Prof. Dr. Martin Wietschel 2015 *Gesamt-Roadmap: Lithium-Ionen-Batterien 2030* (Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI)
[179] Battery University 2020 *U-808: How to Prolong Lithium-based Batteries*
[180] Volta Foundation 2023 *Annual Battery Report 2022* (Volta Foundation)
[181] Stephan A, Hettesheimer T, Neef C, Schmaltz T, Link S, Stephan M, Heizmann J L and Thielmann A 2023 *Alternative Battery Technologies Roadmap 2030+* (Fraunhofer ISI)
[182] Volta Foundation 2023 *Battery Report: Revision: 2024040102*
[183] TRATON 2023 *TRATON GROUP Webcast 2023: Current developments in battery technology for heavy-duty vehicles*
[184] Reif K 2014 *Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure (ATZ / MTZ-Fachbuch)* 5th edn (Wiesbaden: Springer Vieweg)
[185] Dr. Martin Lauer and Ömer Sahin Tas 2019 *Machbarkeitsstudie zum automatisierten Fahren von HO-LKWs im Murgtal: im Rahmen der Begleitforschung zum Projekt eWayBW* (FZI Forschungszentrum Informatik)
[186] Dr. Gerhard Becher, Sebastian Gerres, Sven Altenburg, Dr. Torsten Gründel, Ingrid Nagel, Dr. Sören Grawenhoff, Marcel Vierkötter and Prof. Dr. Dr. Jürgen Ensthaler 2015 *Automatisiert. Vernetzt. Elektrisch.: Potenziale innovativer Mobilitätslösungen für Baden- Württemberg* (Stuttgart: e-mobil Bw GmbH, Prognos AG, Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI, TÜV Rheinland Consultin GmbH and Technische Universität Berlin)
[187] Yole Developpement 2018 *The Automotive LiDAR Market* (Lyon, Frankreich: Yole Developpement)
[188] Cacilo A, Schmidt S, Wittlinger P, Herrmann F, Bauer W, Sawade O, Doderer H, Hartwig M and Scholz V 2015 *Hochautomatisiertes Fahren auf Autobahnen - industriepolitische Schlussfolgerungen* (Stuttgart: Fraunhofer IAO)
[189] König A, Nicoletti L, Schröder D, Wolff S, Waclaw A and Lienkamp M 2021 An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles *World Electric Vehicle Journal* **12**
[190] Kraus D, Ivanov H and Leitgeb E 2019 Approach for an Optical Network Design for Autonomous Vehicles *2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)* pp 1–6
[191] William Riggs 2024 *Estimating the Cost of Autonomous Vehicles* (University of San Francisco - School of Management)
[192] Siebenpfeiffer W (ed) 2015 *Fahrerassistenzsysteme und effiziente Antriebe (ATZ/MTZ-Fachbuch)* (Wiesbaden: Springer Vieweg)
[193] David Bartlett and Dr. Stefania Sesia 2022 *Hybrides Positionierungssystem für automatisierte Fahrzeuge: Kombination von GNSS mit terrestrischer Funkortung* (all-electronics.de)
[194] ITF 2023 *Preparing Infrastructure for Automated Vehicles: Research Report 2023* (Paris)
[195] Ezenwa L C 2022 Drahtlose V2V-Kommunikation mit DSRC-Technik im Vergleich zu C-V2X *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* **124** 42–5
[196] Siegel J E, Erb D C and Sarma S E 2018 A Survey of the Connected Vehicle Landscape—Architectures, Enabling Technologies, Applications, and Development Areas *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* **19** 2391–406

[197] Nicolas La Rocco 2021 *Autonomes Fahren: Nvidia Drive Atlan liefert doppelte Leistung pro Watt* https://www.computerbase.de/2021-04/autonomes-fahren-nvidia-drive-atlan-liefert-doppelte-leistung-pro-watt/ (accessed 20 Feb 2023)
[198] NVIDIA 2019 *Comprehensive Solutions for Self-driving vehicles*
[199] NVIDIA 2020 *NVIDIA Autonomous Vehicles Safety Report*
[200] ADAC e. V 2025 *Event Data Recorder (EDR): Wozu es die Blackbox im Auto braucht*
[201] semiengineering.com August 8th, 2022 *Where Are The Autonomous Cars?: L5 vehicles need at least 10 more years of development.* (Marie C. Baca)
[202] Gawron J H, Keoleian G A, Kleine R D de, Wallington T J and Kim H C 2018 Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects *Environmental Science & Technology* **52** 3249–56
[203] Ersoy M and Gies S (eds) 2017 *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen - Fahrdynamik - Fahrverhalten - Komponenten - elektronische Systeme - Fahrerassistenz - autonomes Fahren - Perspektiven (ATZ/MTZ-Fachbuch)* 5th edn (Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg)
[204] Mascha Brost, Johannes Ultsch, Andreas Schäfer and Johann Kelsch 2017 *X - by-Wire: Projektbericht NGC FiF X-by-Wire; NGC-FiF TP10000 Zusammenfassender Bericht zu den Meilensteinen* (Stuttgart: DLR)
[205] Hilgers M 2016 *Getriebe und Antriebsstrangauslegung (SpringerLink Bücher)* (Wiesbaden: Springer Vieweg)
[206] Kalinowski J, Drage T and Bräunl T 2014 Drive-By-Wire for an Autonomous Formula SAE Car *IFAC Proceedings Volumes* **47** 8457–62
[207] Hua X, Zeng J, Li H, Huang J, Luo M, Feng X, Xiong H and Wu W 2023 A Review of Automobile Brake-by-Wire Control Technology *Processes* **11**
[208] Dr. Robert Protzmann, Dr. Ilja Radusch, Dr. Andreas Festag, Dr. Richard Fritzsche and Marco Rehme 2018 *IV2X: INTEGRIERTE BETRACHTUNG FAHRZEUGKOMMUNIKATION: Projektnummer: 141488* (Berlin: Stadt Berlin, Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe)
[209] ITS 2018 *Cellular-V2X (C-V2X) communication modules that use wireless wide-area network (WWAN) Cellular modems to broadcast and receive basic safety messages (BSM): An analysis of V2X OBU design alternatives: Dedicated Short Range Communication (DSRC) and Cellular-V2X.* (accessed 15 Apr 2023)
[210] Wallentowitz H (ed) 2006 *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen ; mit zahlreichen Tabellen (ATZ-MTZ-Fachbuch)* 1st edn (Wiesbaden: Vieweg)
[211] Patrick M. Bösch, Felix Becker, Henrik Becker and Kay W. Axhausen 2018 Cost-based analysis of autonomous mobility services *Transport Policy* **64** 76–91
[212] Adrian Paul König 2023 *Methodik zur Auslegung von autonomen Fahrzeugkonzepten: Dissertation* (TUM)
[213] Philipp Kluschke, Maren Uebel and Martin Wietschel 2019 *Alternative Antriebe im straßengebundenen Schwerlastverkehr: eine quantitative Ermittlung der Nutzeranforderungen an schwere Lkw und deren Infrastruktur: Working Paper Sustainability and Innovation* (Fraunhofer ISI)
[214] AGQM 2018 *Freigaben der Nutzfahrzeughersteller für den Betrieb mit Biodiesel (B20 | B30 | B100)* (Arbeitsgemeinschaft Qualitätsmanagement Biodiesel e. V.)

[215] Janos Lucian Breuer, Juri Scholten, Jan Christian Koj, Klaus Görner, Detlef Stolten and Ralf Peters 2022 *An Overview of Promising Alternative Fuels for Road, Rail, Air, and Inland Waterway Transport in Germany*
[216] SAE 2021 *J3016 - SURFACE VEHICLE RECOMMENDED PRACTICE: (R) Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles (*APR2021*)* (SAE)
[217] P. Fischer 2016 *Von Fahrerassistenzsystemen zum automatisierten Fahren: Medienhype oder technische Realität?* (Steyr: Institut für Fahrzeugtechnik)
[218] Küçükay F 2022 *Grundlagen der Fahrzeugtechnik: Antriebe, Getriebe, Energieverbrauch, Bremsen, Fahrdynamik, Fahrkomfort* (Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg)
[219] Prof. Dr. Wörner, Patrick Bauer, Christian Latu, Steffen Schwager, Lucas Schweizer and Chris Wandura 2017 Autonomes Fahren: Wie beeinflusst der Einsatz von HAFSystemen technisch die bestehende Architektur von E-Fahrzeugen?: Seminararbeit im Studiengang Technische Betriebswirtschaft / Automobilindustrie (TAB) *Seminararbeit* Fakultät Betriebswirtschaft, Hochschule Esslingen
[220] Europäischen Union 2017 *VERORDNUNG (EU) 2017/1151 DER KOMMISSION vom 1. Juni 2017 zur Ergänzung der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Fahrzeugreparatur- und -wartungsinformationen, zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission sowie der Verordnung (EU) Nr. 1230/2012 der Kommission und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 692/2008 der Kommission: L 175/1 (*vol 2017*)*
[221] EUROPEAN COMMISSION 2017 *VECTO tool development: Completion of methodology to simulate Heavy Duty Vehicles' fuel consumption and CO2 emissions: Report No. I 15/17/Rex EM-I 2013/08 1670* (TU Graz, ICCT, TNO TÜV Nord)
[222] Jing Dong and Liang Hu 2018 *Estimating Energy Efficiency of Connected and Autonomous Vehicles in a Mixed Fleet* (Center for Transportation Research and Education, Iowa State University)
[223] Bundestag 2021 *Fünfundfünfzigste Verordnung zur Änderung straßenverkehrsrechtlicher Vorschriften: 2204*
[224] Ruiz V and Di Persio F 2018 *Standards for the performance and durability assessment of electric vehicle batteries: Possible performance criteria for an Ecodesign Regulation (JRC Technical Reports* vol 113420*)* (Luxembourg: Publications Office of the European Union)
[225] Sten Karlsson and Duncan Kushnir 2017 *Systems Perspectives on Electromobility: 5. How energy efficient is electrified transport?* (Sweden: Chalmers University)
[226] Sachverständigenrates 2024 *FRÜHJAHRSGUTACHTEN 2024* https://www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/gutachten/fg2024/FG2024_Gesamtausgabe.pdf

[227] Marie Rajon Bernard, Alexander Tankou, Hongyang Cui, Pierre-Louis Ragon 2022 *CHARGING SOLUTIONS FOR BATTERY-ELECTRIC TRUCKS* (ICCT)
[228] Fries M, lehmeyer M and Lienkamp M *Multi-Criterion Optimization of Heavy-Duty Powertrain Design for the Evaluation of Transport Efficiency and Costs* (2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems)
[229] Chi Li, Alex Rogozhin, Michael Gallaher, Anthony Lentz and Walter McManus 2010 *Heavy Duty Truck Retail Price Equivalent and Indirect Cost Multipliers: RTI Project Number 0211577.003.002* (Office of Transportation and Air Quality)
[230] Duleep K G 2011 *Analysis of technology cost and retail price: Presentation to Committee on Assessment of Technologies for Improving Light-Duty Vehicle Fuel Economy* (Washington, DC: The National Academies Press)
[231] A.D. Little International A D L 1986 *Management Im Zeitalter der Strategischen Führung* 2nd edn (Wiesbaden: Springer Gabler. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH)
[232] Maya Papineau 2006 *An economic perspective on experience curves and dynamic economies in renewable energy technologies* (Energy Policy)
[233] Pollet B G, Kocha S S and Staffell I 2019 Current status of automotive fuel cells for sustainable transport *Current Opinion in Electrochemistry* **16** 90–5
[234] Achim Kampfer, Heiner Heimes, Mario Kehrer, Sebastian Hagedorn and Philipp Reims 2022 *Brennstoffzellensystemkosten durch Skaleneffekte senken (3)* (Springer Maschinenbau)
[235] Yole 2015 *Sensors and Dara Management for Autonomuos Vehicles: Report* (Frankreich: Yole Developpement)
[236] Dr. Ulrich Kramer *et al* 2019 *Climate-neutral driving in 2050: Options for the complete defossilisation of the transport sector. Considerations based on results of the "FVV Fuels Study 2018".: FVV Fuel Study* (Vienna)
[237] Nikolas Hill, Adarsh Varma, James Harries, John Norris and Duncan Kay 2012 *A review of the efficiency and cost assumptions for road transport vehicles to 2050: FINAL* (AEA Ricardo)
[238] Bundestag 2022 *Fünftes Gesetz zur Änderung des Bundesfernstraßenmautgesetzes (*vol 49*)*
[239] Bundesministeriums der Justiz 2006 *Energiesteuergesetz (EnergieStG)*
[240] Deutscher Bundestag 2020 *Die Energiesteuer in Bezug auf Kraftstoffe*
[241] Bundesamt für Justiz 1999 *Stromsteuergesetz (StromStG) (*vol 1999*)*
[242] Europäische Kommission 2003 *COUNCIL DIRECTIVE 2003/96/EC of 27 October 2003 restructuring the Community framework for the taxation of energy products and electricity (*vol 2003*)*
[243] Bundesamt für Justiz 2019 *Gesetz über einen nationalen Zertifikatehandel für Brennstoffemissionen (Brennstoffemissionshandelsgesetz - BEHG): BEHG*
[244] Florian Kleiner, Horst E. Friedrich 2017 *Maintenance & Repair Cost Calculation and Assessment of Resale Value for Different Alternative Commercial Vehicle Powertrain Technologies* (Stuttgart: EVS 30)
[245] Koch P 2013 *Versicherungswirtschaft: Ein einführender Überblick* (Verlag Versicherungswirtschaft)
[246] M. Woyack 2020 *Betriebskosten von automatisierten und vernetzen Nutzfahrzeugkonzepten: Masterarbeit* (DLR FK)

[247] BAUM H, CHRIST R, HOEHNSCHEID K, LERNER M, SCHLEH R and SCHNEIDER J 2005 *Effiziente Verkehrssicherheitsarbeit - eine europaeische Herausforderung* (Bundesanstalt für Straßenwesen)
[248] Destatis 2022 *Verkehrsunfälle: Unfälle von Güterkraftfahrzeugen im Straßenverkehr - Zeitreihen 2021* https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/verkehrsunfaelle-zeitreihen-pdf-5462403.pdf?__blob=publicationFile (accessed 17 Jul 2022)
[249] Nicole Trübswetter and Frank Maier 2013 *Fahrerassistenzsysteme – Sicherheitspotential und Marktdurchdringun: Ergonomie Aktuell*
[250] COWI 2006 *Cost-benefit assessment and prioritisation of vehicle safety technologies: Framework Contract TREN/A1/56-2004 Lot 2: Economic assistance activities (*TREN-ECON2-002*)* (European Commission - DG TREN)
[251] Winner H, Hakuli S, Lotz F and Singer C (eds) 2015 *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort (ATZ / MTZ-Fachbuch)* 3rd edn (Wiesbaden: Springer Vieweg)
[252] ifeu 2020 *Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030: Optimierung des Infrastrukturaufbaus für O-Lkw und Analyse von Kostenund Umwelteffekten in der Einführungsphase* (Heidelberg: Fraunhofer IEE and PTV Group, IFEU)
[253] Kai-Philipp Kairies, Dirk Uwe Sauer *Alterungsmechanismen von Lithium-Ionen Batterien* (TU Paderborn)
[254] Julius Jöhrens *et al* 2021 Potentialanalyse für Batterie-Lkw: Teilbericht im Rahmen des Vorhabens „Elektrifizierungspotenzial des Güter- und Busverkehrs - My eRoads“
[255] Felten C 2001 *Adoption und Diffusion von Innovationen: Ein mikroökonomisches Modell (Gabler Edition Wissenschaft)* (Wiesbaden, s.l.: Deutscher Universitätsverlag)
[256] Stachowiak H 1973 *Allgemeine Modelltheorie* (Wien: Springer)
[257] European Parlament 2023 *Updating CO2 emission standards for heavy-duty vehicles* (KRAMER Esther)
[258] Chelsea Baldino, Eamonn Mulholland, Nikita Pavlenko 2023 *Assessing the risks of crediting alternative fuels in Europe’s CO2 standards for trucks and buses*
[259] fuelseurope.eu 2020 *Joint industry statement questions accuracy of ICCT briefing on assessing alleged risks of crediting alternative fuels in Europe's CO2 standards for trucks and buses*
[260] Bundestag 2021 *Gesetz zur Weiterentwicklung der Treibhausgasminderungs-Quote* (Bundesanzeiger)
[261] European Commission 2023 *COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a Union methodology setting out detailed rules for the production of renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin: C(2023) 1087 final*
[262] DEHST 2021 *Das nationale Emissionshandelssystem*
[263] balm 2020 *Struktur der Unternehmen des gewerblichen Straßengüterverkehrs und des Werkverkehrs 2020* (Bundesamt für Logistik und Mobilität)

[264] 2005 *Stadtverkehrsplanung: Grundlagen, Methoden, Ziele* 2nd edn (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg)
[265] BMDV 2023 *Längenstatistik der Straßen des überörtlichen Verkehrs, Stand: 1. Januar 2023* (Bundesministerium für Digitales und Verkehr)
[266] Arval 2023 *MOBILITÄTS- UND FUHRPARKBAROMETER 2023* (Arval Mobility Observatory)
[267] Oguchi M and Fuse M 2015 Regional and Longitudinal Estimation of Product Lifespan Distribution: A Case Study for Automobiles and a Simplified Estimation Method *Environmental Science & Technology* **49** 1738–43
[268] Jihu Zheng, Yan Zhou, Rujie Yu, Dongchang Zhao, Zifeng Lu and Peng Zhang 2019 Survival rate of China passenger vehicles: A data-driven approach *Energy Policy* **129** 587–97
[269] DLR Institut für Fahrezugkonzepte 2021 *VECTOR21: scenario and market analysis software for simulating future vehicle markets* https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/vector21
[270] Prof. Dr. Boris Zimmermann, Christian Kalley, Alexander Quanz, Philipp Knauf, Klaudia Stuczynska, Maria Schmoll, Anamarija Mustapic, Lea Erler, Dominik Käufer and Luisa Werner 2021 *Elektromobile Nutzfahrzeuge wirtschaftlich und nachhaltig einsetzen (EN-WIN): Schlussbericht des Teilvorhabens der Hochschule Fulda* (Fraunhofer IML, TU Berlin, BpW, Ludwig Meyer GmbH)
[271] Europäischen Union 2024 *VERORDNUNG (EU) 2024/1610 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1242 im Hinblick auf die Verschärfung der CO2-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und die Einbeziehung von Meldepflichten, zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/858 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) 2018/956: 2024/1610*
[272] Bundesministerium der Finanzen 1998 *AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Personen- und Güterbeförderung (im Straßen- und Schienenverkehr)": Normen: § 193ff AO , § 7 Abs 1 EStG Aktenzeichen: IV A 8-S 1551-9/98* https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_Personen-und-Gueterbefoerderung.html
[273] UBA 2014 *Kosten- und Modellvergleich langfristiger Klimaschutzpfade (bis 2050)*
[274] Brian Sauser and Jose Ramirez-Marquez, Dinesh Verma, Ryan Gove 2006 *From TRL to SRL: The Concept of Systems Readiness Levels* (Hoboken, NJ: Stevens Institute of Technology)
[275] Holger Trampe 2013 Modellierung und SImulation: Übersicht Informatik Sceientific Computing, Universität Hamburg
[276] European Commission 2025 *CO2 emissions from Heavy-Duty Vehicles: data from the reporting years 2020 to 2022 submitted by manufacturers and member states reported under Regulation (EU) 2018/956*
[277] European Commission 2025 *CO2 emissions from new vans registered in EU27, Iceland (from 2018) and Norway (from 2019) – Regulation (EU) 2019/631.*
[278] Sterman J D ca. 2009 *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world* (Boston: Irwin/McGraw-Hill)
[279] European Commission 2019 *REGULATION (EU) 2019/631 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, setting CO2 emission*

performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011
[280] euractiv.de 2025 *EU-weiter CO2-Preis ab 2027*
[281] Bundesamt für Justiz 2021 *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG) § 37a Pflichten für Inverkehrbringer von Kraftstoffen*
[282] Bundesamt für Justiz *Gesetz über die Erhebung von streckenbezogenen Gebühren für die Benutzung von Bundesautobahnen und Bundesstraßen (Bundesfernstraßenmautgesetz - BFStrMG)*
[283] BMVI 2021 *Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge* (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur)
[284] IEA 2023 *World Energy Outlook 2023: Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A)* (Paris: International Energy Agency)
[285] NOW-GmbH *StandortTOOL: Erdgas: Methodik und Daten* (NOW-GmbH)
[286] Dena *Öffentliche LNG-Tankstellen in Deutschland: Tool* (Dena)
[287] INTRAPLAN 2023 *„Prognose 2022“ Gleitende LangfristVerkehrsprognose 2021-2022: Im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr*
[288] Europäischen Union 2023 *RICHTLINIE (EU) 2023/959 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Union und des Beschlusses (EU) 2015/1814 über die Einrichtung und Anwendung einer Marktstabilitätsreserve für das System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Union: L 130/134*
[289] BMVI 2021 *Bekanntmachung der Richtlinie über die Förderung von leichten und schweren Nutzfahrzeugen mit alternativen, klimaschonenden Antrieben und dazugehöriger Tank- und Ladeinfrastruktur für elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge (reine Batterieelektrofahrzeuge, von außen aufladbare Hybridelektrofahrzeuge und Brennstoffzellenfahrzeuge)* (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur)
[290] Bundesamt für Justiz 2002 *Kraftfahrzeugsteuergesetz 2002*
[291] Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft 2022 *Zukunft der Energiesteuern auf Diesel, Erdgas, Strom & Co: Was bedeutet der Kommissionsvorschlag zur Energiesteuerrichtlinie für Deutschland?* (FÖS)
[292] Dr. Jens Perner, Dr. Michael Thöne, Dr. Stephan Schmitt, Dr. Bernhard Koldert, Joscha Krug, Fabian Schrogl 2021 *ENERGIESTEUER 2.0: KONZEPT FÜR EINE REFORM DER ENERGIESTEUER IM DIENST DES KLIMASCHUTZES: Eine Steuer auf Basis von fossilem CO2* (MWV I W)
[293] deutsche Bundesbank 2024 *Abzinsungszinssätze gemäß § 253 Abs. 2 HGB (*vol 2024*)*
[294] Europäische Zentralbank 2024 *MFI-Zinsstatistik für den Euroraum*
[295] Bundesverband EnergieMittelstand 2024 *Stellungnahme zum Referentenentwurf des Bundesministeriums für Finanzen eines Gesetzes zur steuerlichen Behandlung von lediglich mit E-Fuels betreibbaren Kraftfahrzeugen (E-Fuels-only-Gesetz* (UNITIT Bundesverband)
[296] BMU 2021 *Der Klimaschutzplan 2050 – Die deutsche Klimaschutzlangfriststrategie: Wegweiser in ein klimaneutrales Deutschland* (BMU)

[297] BMWK 2019 *Energieeffizienzstragie 2050* (BMWK)
[298] Dr. Michael Krail, Daniel Speth, Dr. Till Gnann and Prof. Dr. Martin Wietschel 2021 *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland: Treibhausgasneutrale Hauptszenarien Modul Verkehr* (Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI and Consentec GmbH)
[299] Dr. Carl-Friedrich Elmer 2020 *Klimaneutrales Deutschland: DEEP DIVE VERKEHR* (BERLIN: AGORA)
[300] Dr. Michael Krail 2020 *Auto tankt Internet: Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf den Energieverbrauch von Fahrzeugen, Datenübertragung und Infrastruktur* (AGORA)
[301] Mock P 2010 *Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO2-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)* (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)
[302] Redelbach M 2016 *Entwicklung eines dynamischen nutzenbasierten Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktentwicklung für alternative PKW-Antriebskonzepte* (Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)
[303] Nicholas Lutsey 2010 *Review of Technical Literature and Trends Related to Automobile Mass-Reduction Technology: Research Report – UCD-ITS-RR-10-10* (Davis, California: University of California, Davis Institute of Transportation Studies)
[304] Chad Hunter, Michael Penev, Evan Reznicek, Jason Lustbader, Alicia Birky and Chen Zhang 2021 *Spatial and Temporal Analysis of the Total Cost of Ownership for Class 8 Tractors and Class 4 Parcel Delivery Trucks* (National laboratory of the U.S. Department of Energy)
[305] Beniver 2022 *TECHNISCHE KOMPATIBILITÄT UND KONFORMITÄT MIT NORMEN SYNTHETISCHER KRAFTSTOFFE FÜR PKW UND LKW: AP 3 KRAFTSTOFFNUTZUNG* (Stuttgart: DLR Institut für Fahrezugkonzepte)
[306] Global Commerical Vehicle 2025 *Zero-Emission Technology Inventory (ZETI)*
[307] bundeskartellamt *Markttransparenzstelle für Kraftstoffe*
[308] INFRAS 2022 *HBEFA 4.2 - Handbuch für Emissionsfaktoren: Documentation of updates* (Bern/Graz/Heidelberg/Lyon/Göteborg: Umweltbundesamt UBA)

10 Anhang

10.1 Charakterisierung des Straßengüterkraftverkehrs

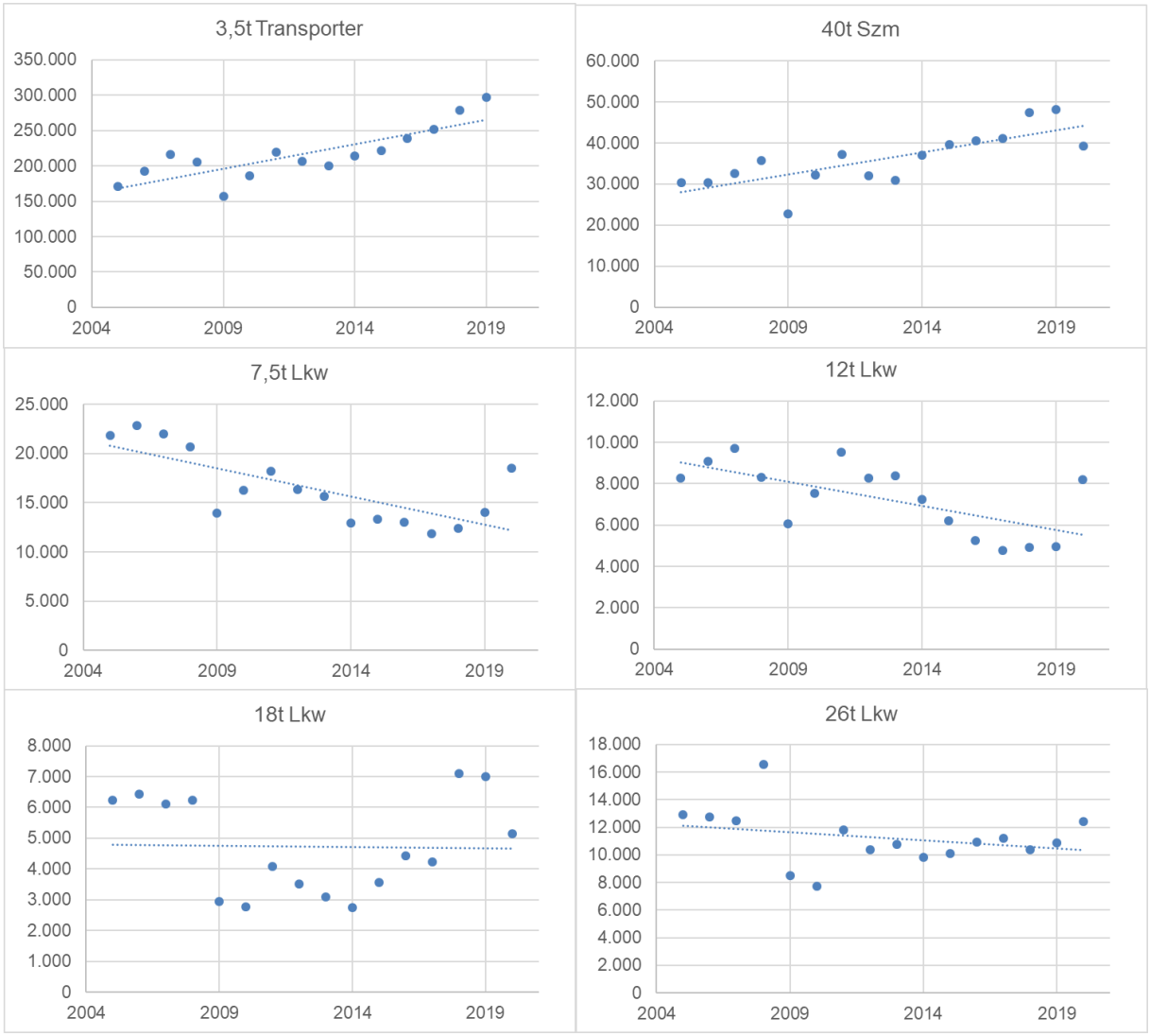


Abbildung 51: Entwicklung der segmentspezifischen Neuzulassungen zwischen 2005 und 2020 (X-Achse: Jahre, Y-Achse: Neuzulassungen) (eigene Darstellung in Anlehnung an [57, 59])

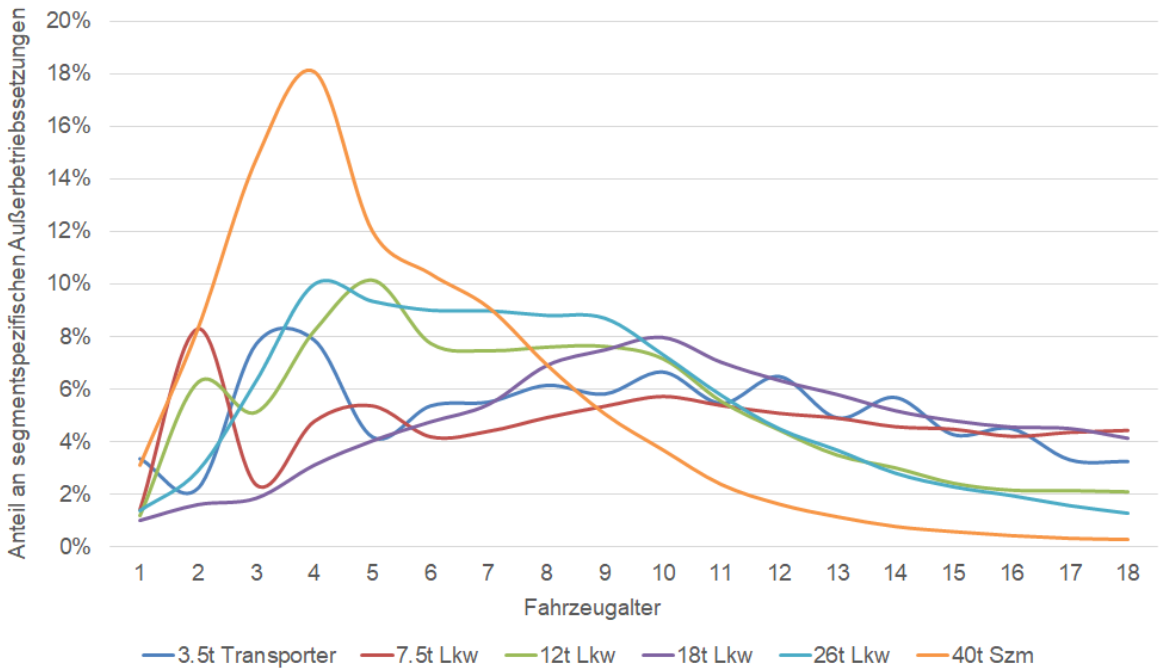


Abbildung 52: Häufigkeitsverteilung der Außerbetriebssetzung nach Fahrzeugsegmente und Fahrzeugalter (In Anlehnung an [59])

Tabelle 40: Anteil ausländischer Fahrten an der Jahresfahrleistung deutscher Nutzfahrzeuge im Jahr 2014 (eigene Berechnung an Anlehnung [60])

Nutzfahrzeugsegment	**Anteil JF_Ausland an JF_Gesamt**
3,5t Transporter	1,18%
7,5t Lkw	0,96%
12t Lkw	1,29%
18t Lkw	2,81%
26t Lkw	2,57%
40t Szm	2,45%



Abbildung 53: Entwicklung der mittlere Jahresfahrleistung in Abhängigkeit ihres Fahrzeugalters (eigene Darstellung in Anlehnung an [60])

10.2 Stand der Technik

Tabelle 41: Marktdaten Diesel-Nutzfahrzeuge im Jahr 2020 (Auszug aus [74])

Fahrzeug-segment	Fabrikat Typ Aufbauart	Leer-gewicht [kg]	Max. Nutzlast [kg]	Lade-volumen [m³]	Motor-leistung [kW]	Motor-hubraum [cm³]	Motordreh-moment [Nm]	Kraftstoff-tank [Liter]	Brutto-Kaufpreis (ohne MwSt)
3,5t Transporter	Ford Transit, Custom FT 350 L, Kasten	2200	1300	9,1	96	1998	385	80	32.300
3,5t Transporter	Renault Trafic 1,6 dCi 95 Kasten	1976	874	6	70	1598	260	80	20.930
3,5t Transporter	Mercedes SPRINTER 311 CDI, Kasten	1995	1505		84	2143	270	76	29.342
3,5t Transporter	MAN TGE Kasten	2031	969	9,9	103	1968	300	75	26.060
3,5t Transporter	IVECO Daily 35 C 18 V Hochkasten Lang	2150	1350	9	132	2998	430	70	41.850
3,5t Transporter	Citroen Jumpy, BlueHDi 145 S&S	1646	844		106	1997	340		41.850
3,5t Transporter	Fiat Ducato, 140 Multijet DPF	1935	1065	8	103	2287	350		29.740
3,5t Transporter	Nissan nv250 dCi115	1395	585		85	1461	260	60	21.120
7,5t Lkw	Mercedes Atego 818 L Koffer, Ladebordwand	4090	3400	34,8	130	5132	700	120	58.200
7,5t Lkw	Renault Midlum 220.8 Plane	3590	3900		162	4764			56.120
7,5t Lkw	IVECO EuroCargo 75 E 16 Koffer	3190	4300		118	3920			56.300
12t Lkw	MAN TGL 12.220 BL Koffer, Ladebordwand	5640	6350		162	4580	875	115	65.400
12t Lkw	Mercedes Atego 1218 Plane	4190	7800		130	4250			68.780
12t Lkw	IVECO EuroCargo 120 E25 Koffer	4300	7700		185	6728			74.600
18t Lkw	MAN TGS 18.420 BL Pritsche	7500	10500		309	12419	1425	310	81.000
18t Lkw	Mercedes Antos 1833 L Pritsche	7550	10450		240	10700			76.800
18t Lkw	IVECO EuroCargo 180 E 28 Koffer	5400	12600		205	6728			92.400
26t Lkw	Mercedes Actros 2545 LL Wechselrahmen	15000	25000		330	12800	1750	390	110.000
26t Lkw	MAN TGX 18.460 XLX Pritsche	13200	26800		338	12419			104.000
26t Lkw	IVECO Stralis AD/AT 260 S 31 Pritsche	20200	19800		228	7790			95.500
40t Szm	DAF XF 410 FT Spacecab	13500	26500		300	10800	2200	395	90.000
40t Szm	Mercedes Actros 1848 LS Streamspace	13300	26700		350	12800			106.500
40t Szm	MAN TGX 18.520 FLS LX	14150	25850		382	15200			108.000
40t Szm	Scania S 730 A, S20H	14500	25500		537	16400			145.000
40t Szm	Volvo FH 13 460 Globetrotter	13800	26200		551	12800			123.575
40t Szm	VOLVO FH 16 650 Globetrotter XL	14400	25600		480	16120			134.000
40t Anhänger	Dreiachs Curtainsider 13,650 mm	11000	29000		0	0			42.300
40t Anhänger	Dreiachs-Hinterkippmulde 25 Kubikmeter	11500	28500		0	0			61.400

Tabelle 42: Systemgewicht pro Baugruppe in kg für segmentspezifische Referenzfahrzeuge

		3,5t Transporter	7,5t Lkw	12t Lkw	18t Lkw	26t Lkw	40 Szm
Zulässiges Gesamtgewicht in kg		3.500	7.500	12.000	18.000	26.000	40.000
Mittleres Fahrzeugleergewicht inkl. Aufbau in kg		1.916	3.623	4.710	6.817	14.500	7.250
Mittleres Anhängerleergewicht in kg							6.692
Systemgewicht pro Baugruppe in kg	Fahrgestellstruktur Rahmen, Feder, Räder, Reifen etc.	168	394	526	2.255	2.398	2.907
		9%	9%	9%	21%	21%	21%
	Fahrwerk Bremsen, Lenkung etc.	430	1.007	1.345	3.404	3.620	4.388
		22%	22%	22%	31%	31%	31%
	Antriebsstrang Motor, Tank, ABG, Getriebe etc.	365	855	1.141	1.292	1.374	1.666
		19%	19%	19%	12%	12%	12%
	Fahrerhaus & Karosserie Interieur und Exterieur	716	1.679	2.241	3.076	3.270	3.964
		37%	37%	37%	28%	28%	28%
	Elektronik Verkabelung etc.	38	90	120	220	234	284
		2%	2%	2%	2%	2%	2%
	Sonstiges	198	465	620	569	605	733
		10%	10%	10%	5%	5%	5%
Quelle: [76, 77, 303, 304]							

Tabelle 43: Systemkosten pro Baugruppe in $EURO_{2020}$ für segmentspezifische Referenzfahrzeuge

			3,5t Transporter	7,5t Lkw	12t Lkw	18t Lkw	26t Lkw	40 Szm
abgeleitete Fahrzeug-Herstellungskosten (Bruttopreis ohne Margen)			17.137	31.280	38.276	45.870	56.742	64.815
abgeleitete Anhänger-Herstellungskosten (Bruttopreis ohne Margen)								28.518
Systemkosten pro Baugruppe in $Euro_{2020}$	Fahrgestellstruktur	17%	2.913	5.318	6.507	7.798	9.646	11.019
	Fahrwerk	20%	3.427	6.256	7.655	9.174	11.348	12.963
	Antriebsstrang	31%	5.313	9.697	11.866	14.220	17.590	20.093
	Fahrerhaus & Karosserie	14%	2.399	4.379	5.359	6.422	7.944	9.074
	Elektronik	11%	1.885	3.441	4.210	5.046	6.242	7.130
	Sonstiges	7%	1.200	2.190	2.679	3.211	3.972	4.537
Quelle: [83–85]								

Tabelle 44: Eigenschaften fossiler, biologischer und synthetischer Dieselkraftstoffe

Eigenschaften	Einheit		Diesel	Diesel B7	FAME	HVO	FT-Diesel	DME	OME	1-Oktanol
Norm		DIN EN 590	DIN EN 590	DIN 51628	DIN EN 14214	DIN EN 15940	DIN EN 15940	DIN/TS 51698	DIN/TS 51699	Kein Standard
Dichte bei 15°C	kg/m³	0,820-0,845	0,832	0,836	0,890	0,780	0,780	0,670	1,067	0,837
Schwefelgehalt	mg/kg	Max. 10	10	10	10	5				
Zündwilligkeit	Cetan-zahl	Min. 51	51	53	56	70	70	55	84	>51
Flammpunkt	°C	Min. 55	67-80	169 +/- 16	>61		55-78			
Siedebereich	°C	150-390	160-360	160-360	300-360	170-350	-22 - 0		155-242	195
kinematische Viskosität bei 40 °C	mm²/s	2-4,5	3,25 +/- 1,25	3,25 +/- 1,25	3,5-5	2,0 +/- 4,15	1,55-4,5			5,7
			Quelle: [96, 305]							

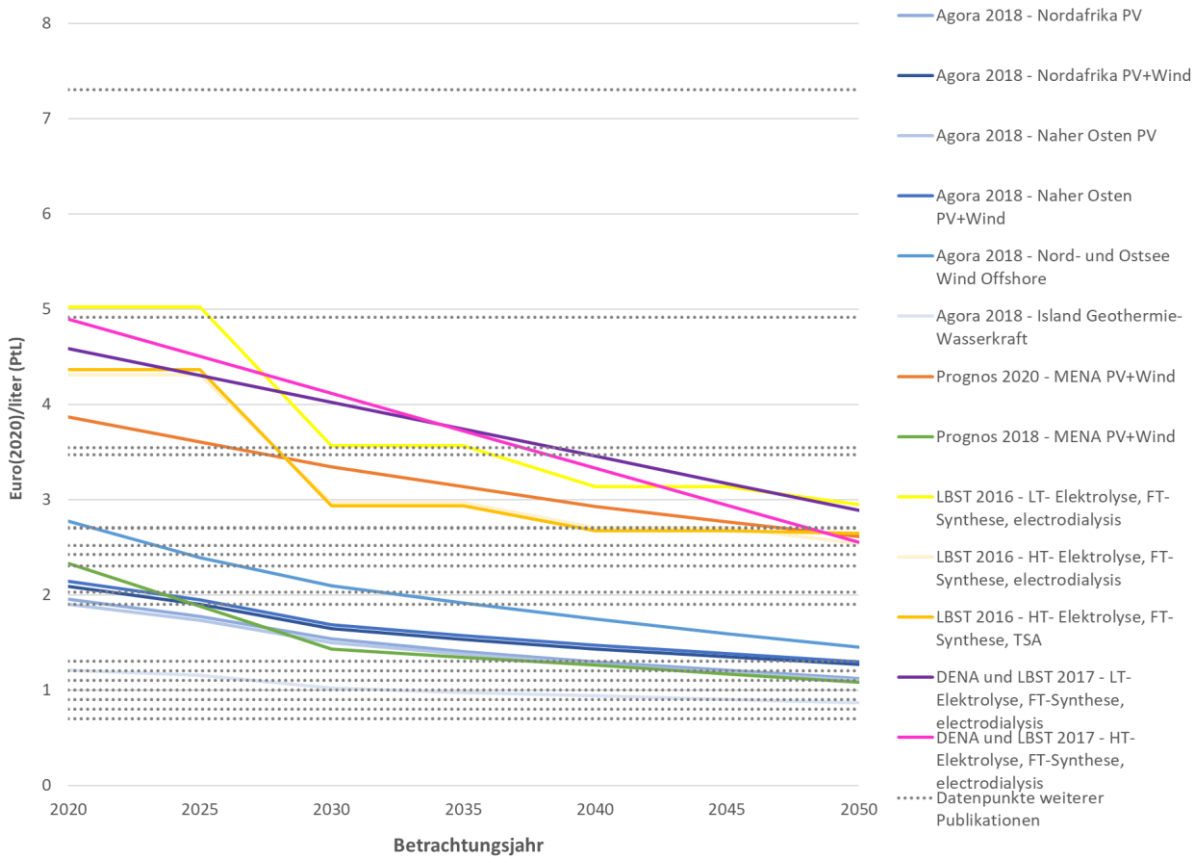


Abbildung 54: Literaturübersicht prognostizierter PtL-Gestehungskosten für großskalige Produktionskapazitäten (auf Basis [99–106])

10.3 Basisparameter

Tabelle 45: Technologiereife und Markteinführungszeitpunkte ausgewählter Energieträger, Antriebsstrang- und Automatisierungssysteme

		Technology Readiness Level	Commercial Readiness Level	Frühster Markteinführungsjahr	Spätester Markteinführungsjahr
Energieträger	B7 Diesel	9	9	Verfügbar	
	FAME	9	9	Verfügbar	
	HVO	9	9	2024	2030
	FT-Diesel	6	3	2026	2030
	DME	9	3	2028*	2035
	OME	5	1	2030*	2035
	1-Oktanol	4	1	2030*	2040
	Fossiles CNG	9	9	Verfügbar	
	Bio-CNG	9	9	Verfügbar	
	Syn-CNG	9	3	2026	2030
	Fossiles LNG	9	9	Verfügbar	
	Bio-LNG	9	9	Verfügbar	
	Syn-LNG	9	3	2026	2030
	AC- oder DC-Normalladen	9	9	Verfügbar	
	DC-Schnellladen (CCS)	9	9	Verfügbar	
	DC-Hochleistungsladen (MCS)	7	6	2025	2030
	Komprimierter Wasserstoff (CH2) 350bar	9	9	Verfügbar	
	Komprimierter Wasserstoff (CH2) 700bar	9	9	Verfügbar	
	Flüssigwasserstoff (LH2)	7	6	2026	2032
Antriebsstrangssystem	ICE-D	9	9	Verfügbar	
	ICE-CNG	9	9	Verfügbar	
	ICE-LNG	9	9	Verfügbar	
	ICE-H2	9	6	2025	2030
	MHEV	9	9	Verfügbar	
	FHEV	9	9	Verfügbar	
	PHEV	9	9	Verfügbar	
	REEV-ICE	9	6	2025	2030
	REEV-FC	9	6	2025	2030
	FCEV CH2	9	9	Verfügbar	
	FCEV LH2	9	9	2027	2032
	BEV	9	9	Verfügbar	
Automatisierungssysteme	Stufe 2	9	9	Verfügbar	
	Stufe 3 urban	9	6 (ab 2036)	2030	2040
	Stufe 3 Regional	9	6 (ab 2031)	2028	2035
	Stufe 3 Highway	9	6 (ab 2028)	2026	2030
	Stufe 4 urban	7*	3 (ab 2042)	2032	2045 >2050

Stufe 4 Regional	7*	3 (ab 2038)	2030	2040 >2050
Stufe 4 Highway	7*	4 (ab 2035)	2028	2035
Stufe 5	4*	1 (ab 2045)	2035	>2050

Quelle: [90, 114, 306] und eigene Annahme*

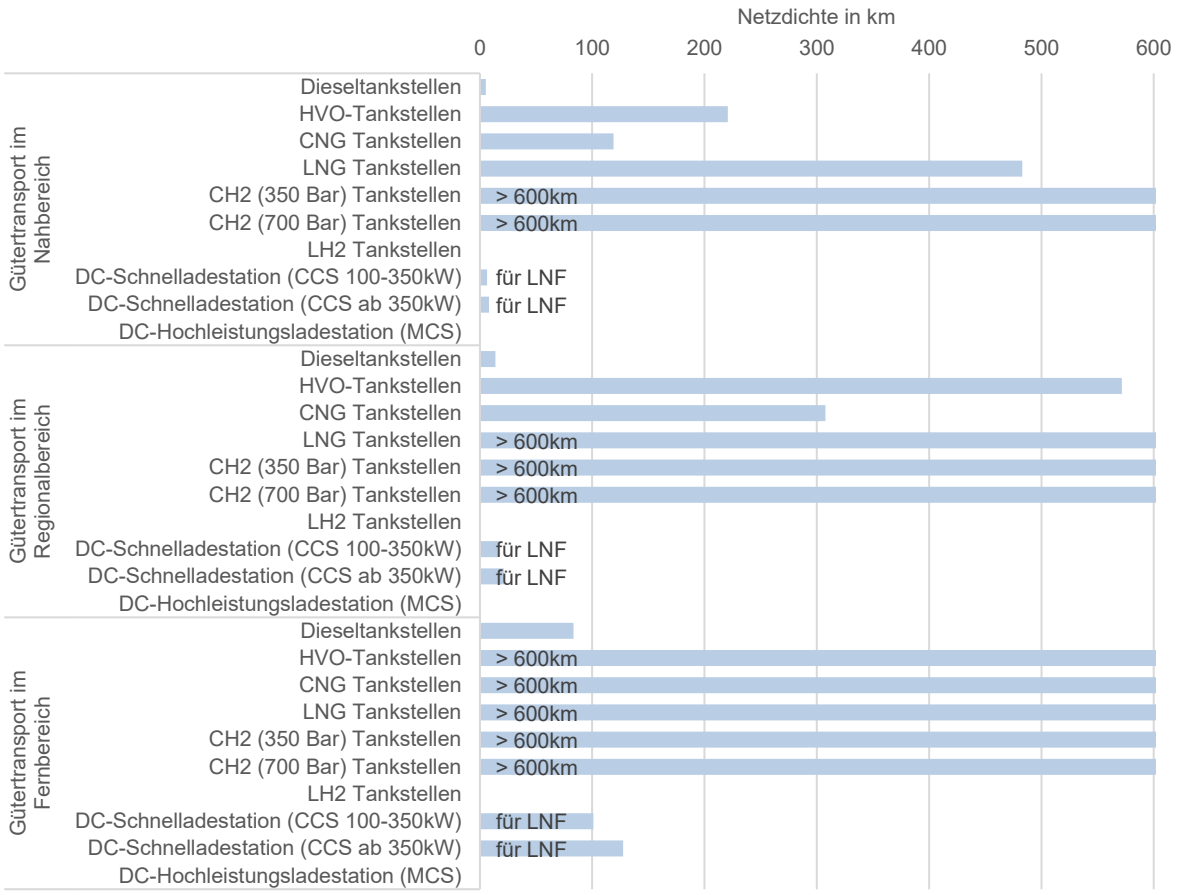


Abbildung 55: Auswertung der Energieinfrastrukturnetzdichte in Deutschland im Jahr 2024 nach Energieträger und Einsatzbereich ([136, 286, 307] sowie Marktdaten)

10.4 Marktmodell

Tabelle 46: Spezifischer Energieverbrauch MJ/km [308]

Jahr	3,5t Transporter	7,5t Lkw	12t Lkw	18t Lkw	26t Lkw	40t Szm
1990	3,68	6,56	8,38	10,65	12,74	15,9
1991	3,49	6,8	8,65	10,65	12,74	15,9
1992	3,55	6,76	8,61	10,62	12,69	15,78
1993	3,59	6,74	8,58	10,58	12,64	15,69
1994	4,67	5,89	7,93	9,87	11,76	14,67
1995	4,58	5,83	7,84	9,68	11,52	14,54
1996	4,36	5,77	7,77	9,6	11,44	14,44
1997	4,41	5,69	7,7	9,55	11,39	14,37
1998	4,4	5,64	7,67	9,53	11,35	14,32
1999	4,36	5,62	7,65	9,51	11,33	14,29
2000	4,33	5,74	7,76	9,77	11,4	14,29
2001	3,31	5,79	7,79	9,86	11,44	14,28
2002	3,25	5,81	7,81	9,9	11,45	14,28
2003	3,18	5,83	7,82	9,92	11,46	14,28
2004	3,21	5,63	7,54	9,76	11,22	14,01
2005	3,26	5,63	7,46	9,63	10,43	13,96
2006	3,27	5,36	7,01	9,12	10,26	13,17
2007	3,51	5,36	6,73	8,97	10,12	13,04
2008	3,5	5,33	6,61	8,84	10,03	12,93
2009	3,31	5,21	6,49	8,71	9,96	12,85
2010	3,31	5,16	6,43	8,65	9,92	12,78
2011	3,32	5,15	6,27	8,44	9,67	12,4
2012	3,39	5,01	6,27	8,43	9,66	12,38
2013	3,44	5,01	6,27	8,42	9,62	12,34
2014	3,45	4,96	6,18	8,34	9,52	12,22
2015	3,46	4,94	6,14	8,26	9,43	12,12
2016	3,45	4,88	6,1	8,18	9,34	12,03
2017	3,37	4,84	6,06	8,12	9,27	11,95
2018	3,33	4,72	6,07	8,29	9,57	12,63
2019	3,29	4,67	6,01	8,21	9,48	12,51
2020	3,17	4,68	5,99	8,12	9,38	12,38
2021	3,12	4,63	5,91	8,03	9,29	12,37
2022	3,09	4,57	5,84	7,96	9,22	12,35

Tabelle 47: Spezifischer CO_2-Verbrauch in CO_2/km [308]

Jahr	3,5t Transporter	7,5t Lkw	12t Lkw	18t Lkw	26t Lkw	40t Szm
1990	207,39	546,65	620,41	788,17	942,65	1176,94
1991	207,08	546,39	640,04	788,17	942,65	1176,94
1992	208,59	544,09	636,96	785,72	939,31	1168,03
1993	210,13	545,08	635,13	782,68	935,17	1160,92
1994	181,6	541,61	586,75	730,65	870,75	1086,18
1995	180,76	546,61	579,98	716,54	852,48	1076,01
1996	182,48	546,22	575,06	710,59	846,8	1068,99
1997	183,59	544,87	570,1	707,05	842,7	1063,44
1998	156,07	541,68	567,56	705,04	840,02	1059,88
1999	133,56	546,45	566,41	704	838,55	1057,89
2000	296,27	546,53	573,88	723,19	843,33	1057,37
2001	297,84	544,08	576,47	729,21	846,06	1056,74
2002	269,66	545,31	577,74	732,27	847,3	1056,26
2003	249,72	541,23	578,14	733,49	847,69	1055,53
2004	229,56	544,52	557,47	721,55	829,06	1035,35
2005	178,38	541,37	550,65	710,94	768,53	1030,93
2006	352,75	540,05	516,36	671,72	755,31	970,42
2007	353,41	485,42	495,85	660,89	746,52	960,33
2008	317,49	462,53	487,11	651,52	739,87	953,47
2009	276,76	459,86	478,71	642,83	734,95	947,99
2010	220,42	457,72	474,21	638,07	732,25	942,77
2011	184,11	415,16	462,96	622,66	713,87	915,22
2012	175,54	411,56	462,95	622,38	713,07	913,82
2013	127,39	430,99	462,73	621,74	710,55	910,9
2014	256,69	428,51	453,18	611,95	697,94	896,07
2015	232,08	415,91	450,75	606,84	692,2	890,05
2016	181,45	414,31	447,18	600,06	685,38	882,61
2017	332,84	402,83	444,42	595,84	680,26	876,35
2018	236,43	394,97	445,33	607,68	701,87	926,62
2019	138,79	374,86	441,12	601,95	695,23	917,84
2020	179,23	334,83	438,95	595,14	687,17	907,13
2021	256,24	379,97	433,47	589,02	680,91	906,82
2022	138,79	379,97	428,44	583,9	675,71	905,26

Tabelle 48: Unterschiede im Endenergieverbrauch des Straßengüterkraftverkehr zwischen Inlandskonzept und Energiebilanz [29]

	Energieverbrauch nach Inlandkonzept		**Energieverbrauch nach Energiebilanz**		**Anpassungsfaktor**	
	LNF	**SNF**	**LNF**	**SNF**	**LNF**	**SNF**
1990	52 PJ	381 PJ	54 PJ	394 PJ	1,04	1,03
2018	182 PJ	648 PJ	161 PJ	580 PJ	0,88	0,9

Lebenslauf

Ab 01.2025	**Systemingenieur** Mahle International, Corporate Research, Project House Vehicle Systems, Stuttgart
10.2021 bis 12.2025	**Promotion** **Fokus: Technologiebewertung & Marktanalyse** Universität Stuttgart
11.2017 bis 12. 2024	**Wissenschaftlicher Mitarbeiter** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart
04.2014 bis 08.2017	**Masterstudium – Maschinenbau** **Spezialisierung: Integrierte Produktentwicklung** Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg
12.2016 bis 08.2017	**Masterand & Praktikant** MAN Truck & Bus, Nürnberg, Konzernstrategie und Produktionsplanung
08.2025 bis 12.2015	**Auslandssemester – Maschinenbau** California State University Long Beach, USA
12.2014 bis 07.2016	**Werkstudent & Praktikant** Siemens AG, Nürnberg, Technologie-Vorfertigung, Large Drives
10.2011 bis 03.2015	**Bachelorstudium – Maschinenbau** Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg