

Vergleichende Bewertung zur ganzheitlichen Untersuchung neuartiger, im Betrieb modularer Fahrzeugkonzepte für den urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehr

Christian Ulrich

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Fahrzeugkonzepte
Stuttgart



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Forschungsbericht 2024-08

Vergleichende Bewertung zur ganzheitlichen Untersuchung neuartiger, im Betrieb modularer Fahrzeugkonzepte für den urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehr

Christian Ulrich

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Fahrzeugkonzepte
Stuttgart

296 Seiten
56 Bilder
61 Tabellen
449 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-2024-08
Erscheinungsjahr 2024
DOI: [10.57676/qcdc-k252](https://doi.org/10.57676/qcdc-k252)

D 93 (Dissertation der Universität Stuttgart)

Erklärung des Herausgebers:

Als Manuskript gedruckt.

Abdruck oder sonstige Verwendung nur nach Absprache mit dem DLR gestattet.

multikriterielles Bewertungsmodell, modulares Fahrzeugkonzept, urbaner Transport, Relevant Cost of Ownership (RCO), Life Cycle Assessment (LCA), Technologieprognose, disruptives Potenzial

Christian ULRICH
DLR, Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart

Vergleichende Bewertung zur ganzheitlichen Untersuchung neuartiger, im Betrieb modularer Fahrzeugkonzepte für den urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehr
Universität Stuttgart (Dissertation)

Vor dem Hintergrund steigender Transportbedarfe in Städten durch die Urbanisierung bei sich gleichzeitig änderndem Mobilitäts- und Konsumverhalten entstehen neuartige Fahrzeugkonzepte für den urbanen Straßenverkehr. Diese werden zusätzlich durch Nachhaltigkeitsziele sowie die Technologietrends Elektrifizierung, Automatisierung und Vernetzung geprägt und verfolgen unterschiedliche Strategien der Flexibilisierung und Modularisierung. Welche dieser Fahrzeugkonzepte das Potenzial besitzen, den Verkehr in Städten nachhaltig zu verbessern, ist jedoch noch weitgehend offen.

Diese Arbeit hat zum Ziel, ein Bewertungsmodell zu entwickeln, mit dem neuartige Fahrzeugkonzepte ganzheitlich und konsistent bewertet werden können. Da diese Fahrzeugkonzepte Transportprozesse verändern, werden sie in Referenzanwendungen des urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehrs untersucht, wobei durch eine systemische Flottenbetrachtung auch Effizienzpotenziale berücksichtigt werden. Die Bewertung erfolgt anhand eines Kriterienkatalogs, der in einer Expertenbefragung validiert und gewichtet wird. Hierzu werden verkehrliche Kenngrößen aus Einsatzszenarien ermittelt, eine auf die eingesetzte Flotte erweiterte Gesamtkostenanalyse durchgeführt und eine Ökobilanzierung für unterschiedliche Modularisierungsstrategien entwickelt. Es wird eine neue Methode von kombinierten Roadmaps zur prospektiven Technologieverfügbarkeit erarbeitet, welche Prognoseunsicherheiten reduziert. Abschließend wird das disruptive Potenzial der Fahrzeugkonzepte aus der Disruptionstheorie abgeleitet.

Das entwickelte Bewertungsmodell wird exemplarisch auf die Fahrzeugkonzepte in einer Referenzanwendung (hier Stuttgart-Vaihingen) eingesetzt und auf Plausibilität überprüft. Die erhöhte Einsatzflexibilität von on-the-road modularen Fahrzeugkonzepten erweist sich dabei als besonders vorteilhaft hinsichtlich verkehrlicher und ökonomischer Kennzahlen. Als kritischer Pfad für die Technologieverfügbarkeit der fahrerlosen Fahrzeugkonzepte wird die Automatisierung identifiziert, welche zudem einen hohen Anteil an den Emissionen in der Ökobilanz verursacht. On-the-road modulare Fahrzeugkonzepte weisen ein höheres disruptives Potenzial auf als die übrigen Fahrzeugkonzepte.

Mit dieser Arbeit wird der Stand der Forschung um ein allgemeingültiges Bewertungsmodell erweitert, das für unterschiedliche Anwendungsfälle und Fahrzeugkonzepte verwendet werden kann.

multi-criteria assessment model, modular vehicle concept, urban transportation, relevant cost of ownership (RCO), life cycle assessment (LCA), technology forecast, disruptive potential
(Published in German)

Christian ULRICH

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

Comparative assessment for the holistic analysis of novel, on-the-road modular vehicle concepts for commercial urban passenger and freight transportation

University of Stuttgart (PhD thesis)

In light of increasing transport requirements in cities due to urbanization and changing mobility as well as consumer behavior, novel vehicle concepts for urban road transport are emerging. These are also shaped by sustainability goals coupled with the technology trends of electrification, automation as well as connectivity and pursue various strategies of flexibilization and modularization. However, it is still largely unclear which of these vehicle concepts have the potential to sustainably improve traffic in cities.

The aim of this work is to develop an assessment model that can be used to evaluate novel vehicle concepts holistically and consistently. As these vehicle concepts change transportation processes, they are examined in reference applications of urban passenger and freight transport, whereby efficiency potentials are also considered through a systemic vehicle fleet analysis. The evaluation is based on a catalogue of criteria that is validated and weighted in an expert survey. Transport parameters are determined out of deployment scenarios, an overall cost analysis extended to the employed vehicle fleet is carried out and a life cycle assessment for different modularization strategies is developed. A new method of combined roadmaps for prospective technology availability is being developed, which reduces forecasting uncertainties. Finally, the disruptive potential of the vehicle concepts is derived from disruption theory.

The developed evaluation model is applied exemplarily to the vehicle concepts in a reference application (here Stuttgart-Vaihingen) and checked for plausibility. The increased operational flexibility of on-the-road modular vehicle concepts proves to be particularly advantageous in terms of traffic and economic indicators. Automation is identified as the critical path for the technological availability of driverless vehicle concepts, which also causes a high share of emissions in the life cycle assessment. On-the-road modular vehicle concepts show a higher disruptive potential than the other vehicle concepts.

This work expands the state of research with a generally valid evaluation model that can be used for different applications and vehicle concepts.

Vergleichende Bewertung zur ganzheitlichen Untersuchung neuartiger, im Betrieb modularer Fahrzeugkonzepte für den urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehr

**Comparative assessment for the holistic analysis of novel, on-the-road modular
vehicle concepts for commercial urban passenger and freight transportation**

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

Vorgelegt von

Christian Ulrich, M. Sc.

aus Aalen, Deutschland

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich Prof. Dr.-Ing. Tjark Siefkes
Tag der mündlichen Prüfung:	27. März 2024

Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart der Universität Stuttgart

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

2024

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugkonzepte des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR). Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Horst E. Friedrich für seine Unterstützung und Förderung. Weiterhin bedanke ich mich herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich und Prof. Dr.-Ing. Tjark Siefkes für die Übernahme des Koreferats.

Ein großer Dank gilt auch Dr.-Ing. Stephan Schmid für die ausgezeichnete Betreuung und die wertvollen Hinweise zur Arbeit. Für den fachlichen Austausch und die gute Arbeitsatmosphäre danke ich meinen Kolleginnen und Kollegen am DLR sowie den ehemaligen studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, Benedikt Müller, Katharina Bieber, Bajram Hoxha, Paul Schall, Keke Merz und Johanna Hable für ihre Beiträge und vielfältige Unterstützung. Meinem Kollegen Robert Hahn danke ich herzlich für die Gestaltung der Fahrzeugkonzeptbilder, die diese Arbeit bereichern.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie, meiner Freundin und allen Freunden für ihre Geduld und Begleitung während der Promotionszeit bedanken. Ganz besonders danke ich meinen Eltern, die mich stets uneingeschränkt unterstützt haben.

Stuttgart, März 2024

Christian Ulrich

Kurzfassung

Vor dem Hintergrund steigender Transportbedarfe in Städten durch die Urbanisierung bei sich gleichzeitig änderndem Mobilitäts- und Konsumverhalten entstehen neuartige Fahrzeugkonzepte für den urbanen Straßenverkehr. Diese werden zusätzlich durch Nachhaltigkeitsziele sowie die Technologietrends Elektrifizierung, Automatisierung und Vernetzung geprägt und verfolgen unterschiedliche Strategien der Flexibilisierung und Modularisierung. Welche dieser Fahrzeugkonzepte das Potenzial besitzen, den Verkehr in Städten nachhaltig zu verbessern, ist jedoch noch weitgehend offen.

Diese Arbeit hat zum Ziel, ein Bewertungsmodell zu entwickeln, mit dem neuartige Fahrzeugkonzepte ganzheitlich und konsistent bewertet werden können. Da diese Fahrzeugkonzepte Transportprozesse verändern, werden sie in Referenzanwendungen des urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehrs untersucht, wobei durch eine systemische Flottenbetrachtung auch Effizienzpotenziale berücksichtigt werden. Die Bewertung erfolgt anhand eines Kriterienkatalogs, der in einer Expertenbefragung validiert und gewichtet wird. Hierzu werden verkehrliche Kenngrößen aus Einsatzszenarien ermittelt, eine auf die eingesetzte Flotte erweiterte Gesamtkostenanalyse durchgeführt und eine Ökobilanzierung für unterschiedliche Modularisierungsstrategien entwickelt. Es wird eine neue Methode von kombinierten Roadmaps zur prospektiven Technologieverfügbarkeit erarbeitet, welche Prognoseunsicherheiten reduziert. Abschließend wird das disruptive Potenzial der Fahrzeugkonzepte aus der Disruptionstheorie abgeleitet.

Das entwickelte Bewertungsmodell wird exemplarisch auf die Fahrzeugkonzepte in einer Referenzanwendung (hier S-Vaihingen) eingesetzt und auf Plausibilität überprüft. Die erhöhte Einsatzflexibilität von on-the-road modularen Fahrzeugkonzepten erweist sich dabei als besonders vorteilhaft hinsichtlich verkehrlicher und ökonomischer Kennzahlen. Als kritischer Pfad für die Technologieverfügbarkeit der fahrerlosen Fahrzeugkonzepte wird die Automatisierung identifiziert, welche zudem einen hohen Anteil an

den Emissionen in der Ökobilanz verursacht. On-the-road modulare Fahrzeugkonzepte weisen ein höheres disruptives Potenzial auf als die übrigen Fahrzeugkonzepte.

Mit dieser Arbeit wird der Stand der Forschung um ein allgemeingültiges Bewertungsmodell erweitert, das für unterschiedliche Anwendungsfälle und Fahrzeugkonzepte verwendet werden kann.

Abstract

Due to the increasing demand for transportation in cities as a result of urbanization and simultaneously changing mobility and consumer behavior, novel vehicle concepts for urban road traffic are emerging. These are additionally influenced by sustainability goals as well as the technology trends electrification, automation and connectivity and pursue distinct strategies of flexibilization and modularization. Which of these novel on-the-road integral and on-the-road modular vehicle concepts have the potential to sustainably improve traffic in cities, remains open, however.

Due to the complexity of the changes that the introduction of novel vehicle concepts has on existing transport processes, a one-dimensional evaluation of the vehicles is not sufficient. Instead, a holistic comparison of different novel vehicle concepts based on a set of criteria is required. According to the United Nations, important assessment criteria for sustainable transportation systems include economic, ecological and social dimensions. For the stakeholders in urban passenger and freight transport, the prospective availability of vehicle concepts and their disruptive potential are also relevant criteria for their strategic planning. The current state of research includes a large number of publications that examine on-the-road integral vehicles on the basis of a range of criteria. For on-the-road modular and flexible vehicle concepts, meanwhile, there is a research gap: While initial work in this area primarily conducts traffic simulations, there is a lack of a multi-criteria assessment model that consistently analyzes modular vehicles as well, considering their impact on the transportation system.

The aim of this work is therefore the development of a methodology for the holistic assessment of novel, on-the-road integral as well as modular vehicle concepts in urban passenger and freight transport.

For this purpose, a methodological framework is designed, whereby novel vehicle concepts must first be analyzed to introduce a systematization into new vehicle classes. A field analysis is necessary to synthesize reference applications that can be used to

consistently analyze the vehicle concepts. The combination of vehicle and use case results in operational scenarios, which allow a detailed qualitative and quantitative evaluation of the vehicle concepts in a benefit analysis, a cost analysis and a life cycle assessment. As a further key requirement for the strategic orientation of stakeholders in the transportation sector, an approach must be developed to determine the prospective availability of the vehicle concepts. Finally, the previously elaborated findings are incorporated into a new approach for evaluating the disruptive potential of vehicle concepts. This work first develops the evaluation model theoretically and then applies it exemplarily.

First, transportation concepts on land, on water, and in the air are examined and trends are identified that are common to all modes of transportation: electrification, automation, and intermodality. In addition, road-based concepts in particular are characterized by a trend toward consistent modularization.

Modularization strategies are divided into strategies in production and in operation: An in-production modular approach is, for example, the platform strategy. In operation respectively on-the-road, these vehicles are integral, however, meaning that individual modules can no longer be separated from each other. On-the-road modular vehicle concepts separate the driving and transport units also in operation, in order to transport different, application-optimized transport units with one standardized driving unit. The existing EC vehicle classification, which distinguishes between vehicle mass and intended application, is unsuitable for novel, flexible and on-the-road modular vehicle concepts for which the application and mass can change during operation.

In order to cover and systematize the variety of novel vehicle concepts present on the market, a new classification is being developed considering flexibilization and modularization strategies. The hierarchy of vehicle classes is first divided into on-the-road integral and on-the-road modular vehicles. The former includes conventional-integral

vehicles (status quo, Van 🚐, and its driverless equivalent, RoboVan 🚐), flexible movers (Flex 🚐), and integral movers (Mover 🚐). Flex vehicles couple multiple integral units in a platoon. Movers are application-optimized vehicles and are commonly referred to as people or cargo movers. The on-the-road modular vehicle class distinguishes between “infrastructure-based modular” (iMod 🚐) and “standalone modular” (U-Shift 🚐). Their difference concerns the way the transport unit is changed: iMod vehicles rely on infrastructure support, while U-Shift vehicles perform the change on their own.

Complementing the characterization of novel vehicle concepts, the context of urban passenger and freight transport is examined. To meet the increasing demand for transport in cities, new solutions for established transport processes are being explored: In public passenger transport, these include rideselling approaches or demand-driven systems such as Demand Responsive Transport (DRT). In freight transport, especially part-load transport, consumer goods distribution and parcel services (CEP) are identified as segments with a major impact on city logistics. For these, differing concepts from the status quo, such as microhubs, goods handover lockers or consolidation centers, are discussed in the literature. For a possible combination of passenger and freight transports, typical operating hours of urban transports are analyzed, which overlap most between 6 a.m. and 6 p.m.

Based on the field analysis, a morphological matrix is developed in which relevant characteristics describe possible use cases in various configurations, such as different solutions for passenger transportation and delivery concepts in city logistics. From this, reference applications for the assessment of vehicle concepts can be synthesized.

The combination of vehicle concepts with a reference application results in operational scenarios that describe how different vehicle concepts solve the transport tasks of the

reference application. On the basis of these operational scenarios, the comparative assessment of vehicle concepts follows. For this purpose, the previously conceptualized assessment model is methodically developed and formalized.

A method for the calculation of transportation demand using traffic interconnection matrices, statistical data and a GIS analysis is developed. Based on this, the approach of the continuum approximation analysis is modified in order to determine transport-related key figures such as fleet size and mileage from the disposition. Instead of individual vehicles, fleets are considered to consider possible efficiency gains of the alternative solutions.

For the benefit analysis which is part of the assessment model, the methods of weighted sum model and Analytical Hierarchy Process (AHP) are combined to qualitatively compare the novel vehicle concepts based on a set of criteria while at the same time increasing the results' objectivity. 51 criteria relevant for the evaluation in 6 benefit categories are empirically validated and weighted in an online survey. The vehicles with the highest benefit value are examined quantitatively regarding the benefit criteria "costs" and "ecological impact."

For a comprehensive cost analysis, the relevant cost of ownership (RCO) approach is modified in such a way that the systemic annual costs of fleets comprising driving and transport units with different holding periods, infrastructure requirements, and mileage can be calculated in a consistent manner. The approach is complemented by sensitivity and break-even analyses.

For the assessment model, a life cycle assessment according to DIN EN ISO 14040 and DIN EN ISO 14044 is implemented for both integral and modular vehicles, with a fleet approach considering systemic efficiency gains. By scaling the masses of the driving and transport units on the basis of their service life and relating the functional unit to neutral vehicle kilometers, heterogeneous fleets consisting of different units that are simultaneously used in passenger and freight transport can be analyzed.

The methods of publication analysis and Delphi expert survey are combined to create a new approach that can be used to determine prospective availability of technologies. A functional and a technological roadmap are merged into an integrated roadmap to identify interdependencies and thus reduce forecast-related uncertainties.

Finally, the assessment model is completed with a methodology for determining the disruptive potential of novel vehicle concepts. The relevant criteria are derived from disruption theory and are validated empirically. The methodology is enhanced by an uncertainty indicator and a threshold, above which new vehicles can prospectively replace the status quo under appropriate circumstances.

After the development of the assessment model, it is applied exemplarily for representatives of the new vehicle classes based on a reference application. For this, the reference application S-Vaihingen with the segments DRT, retail delivery and CEP is defined, its transport demand is quantified and it is derived how different vehicle types fulfill the transport tasks from the developed morphological matrix: e.g. RoboVan vehicles as mobile parcel stations for a use in CEP.

In the subsequent benefit analysis, the U-Shift vehicle concept achieves the highest overall benefit, followed by iMod and Van. Examining the 6 benefit categories allows a more differentiated interpretation of the results: e.g. U-Shift and Van have the highest benefit values in the operation category, followed by RoboVan and Flex.

U-Shift as the vehicle concept with the highest overall benefit is additionally analyzed quantitatively in terms of operational scenario, costs and ecological impact while being compared to the status quo (Van) and its driverless equivalent (RoboVan).

By quantifying the operational scenarios, U-Shift requires fewer driving units than Van and RoboVan due to modularization, but additional transportation units at a ratio of about 9:1. In U-Shift mode, daily overall mileage is equalized into off-peak periods and daily driving peaks are reduced compared to Van and RoboVan.

The total systemic annual costs of Van operation in S-Vaihingen are significantly influenced by the costs for drivers, as also reported in the literature. This results in a significant cost advantage of the driverless concepts RoboVan and U-Shift compared to Van, whereby the U-Shift operation is again more cost-efficient than the RoboVan mode.

The LCA is carried out for all 18 impact categories of the ReCiPe method, with the van operation in S-Vaihingen causing less emissions than the driverless alternatives for most impact categories. This is due to the additional components and higher energy consumption for automation within RoboVan and U-Shift. In U-Shift operation, emissions are similar to RoboVan operation, although slightly lower.

The theoretically developed method for determining prospective technology availability is applied to novel vehicle concepts in this work. Driverless driving is empirically identified as their critical technological path. A publication analysis is conducted leading to a functional roadmap for the different automation levels SAE Level 3-5, which indicates that SAE Level 5 is expected to be market-ready in 2030. A complementary Delphi survey empirically determines the temporal development of about 60 technologies, with some technologies not reaching market maturity until after 2030. Aligning the technological and functional roadmaps indicates that SAE Level 5 will probably be fully market-ready between 2030 and 2035.

For the analysis of potentially disruptive vehicle concepts, the results of the previous assessments are considered in several of the 15 defined disruption criteria. Using the methodology developed in this work, U-Shift, iMod, and Flex are above the threshold for increased disruptive potential, meaning that under certain conditions they could replace or push back the status quo (Van) in the market for urban passenger and freight transportation.

This work extends the current state of research by providing a generally applicable assessment model that can be used for novel, on-the-road integral as well as modular

vehicle concepts, considering different evaluation dimensions. In particular, the scientific added value includes 1) a systematization of new vehicle classes, 2) an approximation model for fleet disposition, 3) an empirically determined set of criteria for the benefit assessment of vehicles in urban passenger and freight transport, 4) an RCO method which is extended to heterogeneous fleets with different holding periods as well as infrastructure and overhead costs, 5) an LCA model that considers different fleet unit lifetimes and the combined application of modular concepts, 6) a combined approach for determining prospective technology availability while reducing forecast-related uncertainties, and 7) a method for identifying potentially disruptive vehicle concepts using a new set of criteria. By applying the developed methodology, a holistic comparative assessment of on-the-road modular vehicle concepts was carried out for the first time.

In further work, the fleet disposition should be optimized within dedicated simulation models to further improve the quantification of operational scenarios. The introduction of novel vehicles influences operational and delivery concepts, so that acceptance studies are recommended. Since ex-ante analyses are always associated with uncertainties, the assessment of technology availability and disruptive potential in particular has to be repeated and reviewed on a regular basis. In addition, the developed assessment method should be applied to various other use cases in order to be able to draw generalizations regarding the advantages and limitations of the vehicle concepts.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	iv
Kurzfassung	v
Abstract	vii
Inhaltsverzeichnis	xiv
Tabellenverzeichnis	xviii
Abbildungsverzeichnis	xx
Abkürzungsverzeichnis	xxii
Symbolverzeichnis	xxvi
1 Einleitung	1
1.1 Literaturanalyse zum Stand der Forschung	3
1.2 Zielsetzung und adressierte Forschungsfragen	7
1.3 Konzeption eines Bewertungsmodells.....	8
1.4 Aufbau der Arbeit.....	10
2 Neuartige, on-the-road modulare Fahrzeugkonzepte	12
2.1 Technologietrends und neue Transportkonzepte.....	12
2.2 Klassifizierung neuartiger Fahrzeugkonzepte.....	14
2.3 Charakterisierung von Fahrzeugklassen und repräsentativer Vertreter.....	17
3 Umfeld des urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehrs	22
3.1 Herausforderungen im urbanen Verkehr.....	22
3.2 Status quo, Trends und neue Konzepte.....	23
3.2.1 Personenbeförderung.....	24
3.2.2 Güterbeförderung	26
3.2.3 Kombiniertes Transport von Personen und Gütern.....	30
3.3 Entwicklung eines morphologischen Kastens.....	31
4 Aufbau und Detaillierung eines multikriteriellen Bewertungsmodells	33
4.1 Methodik zur Quantifizierung von Einsatzszenarien.....	33
4.1.1 Ermittlung des Transportbedarfs.....	33
4.1.2 Ableitung von Einsatzszenarien und verkehrlichen Kenngrößen.....	35
4.2 Vorgehen zur Nutzenanalyse	40
4.2.1 Kombination von Nutzwertanalyse und analytischem Hierarchieprozess.....	41
4.2.2 Erstellung eines Kriterienkatalogs	42
4.2.3 Expertenbefragung zur Ermittlung der Gewichtungen	43
4.2.4 Formalisierung des Nutzenmodells.....	47

4.3	Kostenanalyse mittels Relevant Cost of Ownership	52
4.3.1	Bekannte Methoden zur Kostenanalyse im Fahrzeugumfeld	52
4.3.2	Modifizierung der RCO-Methode	54
4.3.3	Ermittlung der relevanten Kostenbestandteile.....	57
4.3.4	Parameterauswahl für eine Sensitivitätsanalyse	65
4.4	Entwicklung eines Ökobilanzmodells.....	65
4.4.1	Bestehende LCA elektrischer und fahrerloser Fahrzeuge.....	65
4.4.2	Normative Grundlagen für eine Ökobilanzierung	67
4.4.3	Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen.....	67
4.4.4	Modellierung der Stoffströme für die Sachbilanz.....	70
4.4.5	Auswahl relevanter Wirkkategorien.....	73
4.4.6	Parametervariation für eine Sensitivitätsanalyse	74
4.5	Methodik zur Einschätzung prospektiver Technologieentwicklungen.....	75
4.5.1	Bekannte Ansätze zur Prognose von Technologieentwicklungen.....	76
4.5.2	Vorgehen zur Aggregation funktionaler und technologischer Roadmaps	77
4.5.3	Delphi-Befragung zu Technologie- und Herstellungsreifegraden	78
4.6	Adaption der Disruptionstheorie auf Fahrzeugkonzepte.....	80
4.6.1	Disruptionstheorie.....	80
4.6.2	Definition potenziell disruptiver Fahrzeugkonzepte	84
4.6.3	Vorgehen zur Bewertung des disruptiven Potenzials.....	86
5	Anwendung des Bewertungsmodells für ausgewählte Fahrzeugkonzepte	88
5.1	Synthese der Referenzanwendung S-Vaihingen.....	88
5.1.1	Beschreibung der Referenzanwendung	88
5.1.2	Ermittlung der Transportbedarfe.....	91
5.1.3	Einsatzmöglichkeiten der Fahrzeugkonzepte	102
5.2	Erweiterte Nutzenanalyse	103
5.2.1	Paarvergleiche entsprechend der AHP-Methode	103
5.2.2	Ergebnisse des erweiterten Nutzenmodells.....	106
5.2.3	Sensitivitätsanalyse über Dämpfungsfaktoren	111
5.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	112
5.3	Quantifizierung der Einsatzszenarien.....	113
5.3.1	Demand Responsive Transport im ÖPNV	116
5.3.2	Multi- und Single-Stopp-Belieferung in der Citylogistik.....	118
5.3.3	Haustürzustellung und Paketstationen im KEP-Segment	122
5.3.4	Aggregation der verkehrlichen Kenngrößen	126

5.4	Spezifikation der Fahrzeugkonzepte	130
5.5	Berechnung der Relevant Cost of Ownership.....	137
5.5.1	Ableitung der Fahrzeugkosten und Parametrisierung des RCO-Modells....	137
5.5.2	Ergebnisse der Kostenanalyse	140
5.5.3	Sensitivitätsanalyse und Break-Even-Betrachtungen.....	145
5.5.4	Zusammenfassung und Diskussion der Erkenntnisse.....	148
5.6	Auswertung der Ökobilanzierung	151
5.6.1	Sachbilanzen und Stoffströme ausgewählter Fahrzeugalternativen.....	151
5.6.2	Ergebnisse für die ReCiPe-Wirkkategorien.....	153
5.6.3	Sensitivitätsanalyse der Ökobilanzierung.....	163
5.6.4	Diskussion der LCA-Ergebnisse.....	166
6	Prospektive Technologieentwicklung und disruptives Potenzial	169
6.1	Analyse der prospektiven Technologieentwicklung.....	169
6.1.1	Publikationsanalyse zu funktionalen Entwicklungen	170
6.1.2	Delphi-Befragung zur Analyse technologischer Entwicklungen.....	172
6.1.3	Aggregation der funktionalen und technologischen Roadmaps.....	174
6.1.4	Zusammenfassung der Technologievorhersage.....	177
6.2	Bestimmung des disruptiven Potenzials	179
6.2.1	Disruptives Potenzial verschiedener Fahrzeugklassen	179
6.2.2	Zusammenfassung und Grenzen des Vorgehens.....	183
7	Zusammenfassung und Ausblick	184
7.1	Zentrale Ergebnisse.....	184
7.2	Neuartigkeit und wissenschaftlicher Mehrwert.....	192
7.3	Gültigkeitsbereich der Ergebnisse und weiterer Forschungsbedarf.....	194
	Literaturverzeichnis	196
	Anhang	230
A	Literaturverweise für den Stand der Forschung.....	231
B	Spezifikationen am Markt verfügbarer Fahrzeuge der Sprinter-Klasse	236
C	Marktübersicht neuartiger Fahrzeugkonzepte	237
D	Ergänzungen zu Umfeld und Quantifizierung der Einsatzszenarien.....	238
E	Online-Expertenbefragung	239
F	Bewertungsgrundlage der erweiterten Nutzenanalyse.....	245
G	Technische Merkmale von U-Shift	261
H	Wechselkurse und Inflationsrate.....	264
I	Fuzzylogik zur Restwertermittlung.....	264

J	Herstellkosten der Fahrzeugkonzepte	266
K	Wirkkategorien und Stoffstrommodelle für die Ökobilanzierung	270
L	Ergänzungen zur prospektiven Technologieentwicklung	273
M	Bewertungsgrundlage der Analyse zum disruptiven Potenzial.....	289
Lebenslauf		296

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	<i>Charakterisierung ausgewählter Logistikbereiche.....</i>	27
Tabelle 3.2:	<i>Morphologischer Kasten zur Beschreibung von Referenzanwendungen</i>	32
Tabelle 4.1:	<i>Operationalisierung der AHP-Paarvergleich.....</i>	49
Tabelle 4.2:	<i>Szenarien der Sensitivitätsuntersuchungen für die Nutzenbewertung.....</i>	51
Tabelle 4.3:	<i>Kfz-Steuer in Deutschland</i>	61
Tabelle 4.4:	<i>Zusammensetzung der spezifischen Instandhaltungskosten</i>	63
Tabelle 4.5:	<i>Parameter der Restwert-Funktion.....</i>	64
Tabelle 4.6:	<i>Definition der funktionellen Einheit und des Referenzflusses.....</i>	69
Tabelle 4.7:	<i>Definition von Technologie- und Herstellungsreifegraden.....</i>	79
Tabelle 4.8:	<i>Kriterien disruptiven Potenzials neuartiger Fahrzeugkonzepte</i>	85
Tabelle 5.1:	<i>Ergebnis der GIS-Analyse.....</i>	98
Tabelle 5.2:	<i>Paketbedarf von Privatkunden und Verteilung von Paketstationen</i>	100
Tabelle 5.3:	<i>Präferenzmatrix „Flexibilität bezüglich Menge & Art (Gütertransport)“ ..</i>	104
Tabelle 5.4:	<i>Präferenzmatrix „Silent Night Delivery“.....</i>	105
Tabelle 5.5:	<i>Präferenzmatrix „Crash-Sicherheit“.....</i>	106
Tabelle 5.6:	<i>Inputparameter für das DRT-Einsatzszenario.....</i>	116
Tabelle 5.7:	<i>Kenngößen des DRT-Einsatzszenarios</i>	117
Tabelle 5.8:	<i>Sensitivitätsanalyse für das DRT Einsatzszenario</i>	118
Tabelle 5.9:	<i>Inputparameter für Citylogistik-Einsatzszenarien</i>	119
Tabelle 5.10:	<i>Kenngößen der Citylogistik-Einsatzszenarien</i>	121
Tabelle 5.11:	<i>Sensitivitätsanalyse für Citylogistik-Einsatzszenarien.....</i>	122
Tabelle 5.12:	<i>Inputparameter für KEP-Einsatzszenarien</i>	123
Tabelle 5.13:	<i>Kenngößen der KEP Einsatzszenarien.....</i>	125
Tabelle 5.14:	<i>Sensitivitätsanalyse für KEP-Einsatzszenarien.....</i>	126
Tabelle 5.15:	<i>Kenngößen der Einsatzszenarien in der Referenzanwendung.....</i>	129
Tabelle 5.16:	<i>Sensorsetup der Fahrzeugalternativen</i>	135
Tabelle 5.17:	<i>Spezifikation von Van, RoboVan und U-Shift.....</i>	136
Tabelle 5.18:	<i>Herstellkosten der Fahrzeugalternativen im Jahr 2040.....</i>	137
Tabelle 5.19:	<i>Übersicht der Input-Parameter für die RCO-Analyse.....</i>	140
Tabelle 5.20:	<i>Ergebnis der RCO-Sensitivitätsanalyse.....</i>	146
Tabelle 6.1:	<i>Disruptives Potenzial für ausgewählte Kriterien</i>	181
Tabelle A.1:	<i>Stand der Forschung.....</i>	231
Tabelle B.1:	<i>Statistische Auswertung am Markt verfügbarer Fahrzeuge</i>	236
Tabelle C.1:	<i>Marktübersicht on-the-road integraler Fahrzeugkonzepte.....</i>	237

Tabelle C.2:	<i>Marktübersicht on-the-road modularer Fahrzeugkonzepte.....</i>	237
Tabelle D.1:	<i>Konzepte für die Citylogistik.....</i>	238
Tabelle D.2:	<i>Nachfragemengen in der Citylogistik.....</i>	239
Tabelle E.1:	<i>Anzahl vollständiger Antworten in der Online-Befragung.....</i>	239
Tabelle E.2:	<i>Expertise der befragten Personen.....</i>	240
Tabelle E.3:	<i>Kritische Technologiepfade aus der Online-Umfrage.....</i>	241
Tabelle E.4:	<i>Rangfolge der kritischen Technologiepfade aus der Online-Befragung..</i>	242
Tabelle E.5:	<i>Kriteriengewichtungen aus der Online-Befragung.....</i>	243
Tabelle E.6:	<i>Gewichtungen der Nutzenkategorien aus der Online-Befragung.....</i>	244
Tabelle F.1:	<i>Nutzenkriterien.....</i>	245
Tabelle F.2:	<i>Begründungen für die Paarvergleiche im AHP.....</i>	251
Tabelle F.3:	<i>Ergebnisse der Paarvergleiche im AHP.....</i>	258
Tabelle F.4:	<i>Berechnete Nutzwerte je Nutzenkriterien.....</i>	259
Tabelle F.5:	<i>Berechnete Nutzwerte je Nutzenkategorie und Gesamtnutzen.....</i>	261
Tabelle G.1:	<i>Fallunterscheidung zur Berechnung der Wechseldauer.....</i>	263
Tabelle H.1:	<i>Wechselkurse sowie jährliche Inflationsrate.....</i>	264
Tabelle I.1:	<i>Fuzzy-Variablen für die Restwertermittlung.....</i>	265
Tabelle J.1:	<i>Herstellkosten der U-Shift-Einheiten.....</i>	269
Tabelle K.1:	<i>Wirkkategorien und Indikatoren.....</i>	270
Tabelle L.1:	<i>Quellen der Publikationsanalyse zu Automatisierungslevel.....</i>	273
Tabelle L.2:	<i>Modulliste mit Zuordnung der Technologien.....</i>	277
Tabelle L.3:	<i>Beschreibung technologischer Entwicklungen.....</i>	278
Tabelle L.4:	<i>Teilnehmende der Delphi-Befragung.....</i>	287
Tabelle M.1:	<i>Erfüllungsfragen zu den Kriterien potenzieller Disruptivität.....</i>	289
Tabelle M.2:	<i>Operationalisierung der Kriterien potenzieller Disruptivität.....</i>	291
Tabelle M.3:	<i>Begründungen für die Bewertung des disruptiven Potenzials.....</i>	292
Tabelle M.4:	<i>Bewertung des disruptiven Potenzials neuartiger Fahrzeugkonzepte.....</i>	295

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	<i>Literaturanalyse zu bestehenden Bewertungsansätzen</i>	6
Abbildung 1.2:	<i>Methodischer Aufbau des Bewertungsmodells</i>	8
Abbildung 2.1:	<i>Auswahl andersartiger Transportkonzepte</i>	13
Abbildung 2.2:	<i>Modularisierungsstrategien in der Produktion und im Betrieb</i>	15
Abbildung 2.3:	<i>Fahrzeugkonzept-Vertreter der Fahrzeugklassen</i>	18
Abbildung 3.1:	<i>Typische Einsatzzeiten verschiedener Transporte im Tagesverlauf</i>	31
Abbildung 4.1:	<i>Vorgehen der erweiterten Nutzenanalyse</i>	42
Abbildung 4.2:	<i>Hierarchisierung der Nutzenkriterien</i>	43
Abbildung 4.3:	<i>Gewichtung der Nutzenkriterien</i>	45
Abbildung 4.4:	<i>Gewichtung der Nutzenkategorien</i>	46
Abbildung 4.5:	<i>Variation der Gewichtungen der Nutzenkriterien</i>	52
Abbildung 4.6:	<i>Zusammensetzung der Relevant Cost of Ownership</i>	56
Abbildung 4.7:	<i>Produktsystem</i>	68
Abbildung 4.8:	<i>Strommixszenarien</i>	72
Abbildung 4.9:	<i>Methodik zur Bestimmung der Technologieverfügbarkeit</i>	78
Abbildung 4.10:	<i>Anzahl wissenschaftlicher Publikationen zu Disruption</i>	81
Abbildung 4.11:	<i>Entwicklung etablierter und disruptiver Technologien</i>	82
Abbildung 5.1:	<i>Bedarfserhebung und Modal Shift im Personenverkehr</i>	93
Abbildung 5.2:	<i>Tagesganglinie des DRT</i>	94
Abbildung 5.3:	<i>GIS-Abfrage für Gastronomie-Betriebe</i>	96
Abbildung 5.4:	<i>Streckenanalyse zwischen Depot und POI</i>	97
Abbildung 5.5:	<i>Ergebnisse für die Nutzenkategorien und den Gesamtnutzen</i>	107
Abbildung 5.6:	<i>Sensitivität des Gesamtnutzens in Szenario NW_S3</i>	111
Abbildung 5.7:	<i>Sensitivität des Gesamtnutzens in den Szenarien NW_S1/2/4</i>	112
Abbildung 5.8:	<i>Übersicht der Einsatzszenarien</i>	114
Abbildung 5.9:	<i>Fahrzeugbedarf im DRT-Betrieb</i>	117
Abbildung 5.10:	<i>Bedarf an Fahreinheiten im Citylogistik-Betrieb</i>	120
Abbildung 5.11:	<i>Anzahl benötigter Fahreinheiten im KEP Betrieb</i>	124
Abbildung 5.12:	<i>Bedarf an Fahreinheiten in der Referenzanwendung</i>	127
Abbildung 5.13:	<i>Stündliche Fahrleistung in der Referenzanwendung</i>	128
Abbildung 5.14:	<i>Relevant Cost of Ownership der Fahrzeugalternativen</i>	141
Abbildung 5.15:	<i>Zusammensetzung der Fahrzeug-RCO im Personentransport</i>	143
Abbildung 5.16:	<i>Zusammensetzung der Fahrzeug-RCO im Gütertransport</i>	144
Abbildung 5.17:	<i>Möglicher Steuervorteil bei der RoboVan-Flotte</i>	145

Abbildung 5.18:	<i>Break-Even-Analyse zu Herstellkosten</i>	147
Abbildung 5.19:	<i>Break-Even-Analyse zur Haltedauer</i>	148
Abbildung 5.20:	<i>Umweltwirkung im direkten Vergleich der Fahrzeugkonzepte</i>	153
Abbildung 5.21:	<i>Plausibilitätsprüfung in der Ökobilanz</i>	155
Abbildung 5.22:	<i>Umweltwirkung bei einer konservativen und progressiven Entwicklung</i> . 157	
Abbildung 5.23:	<i>Umweltwirkungen für ausgewählte Wirkkategorien</i>	159
Abbildung 5.24:	<i>Hauptverursacher der Umweltwirkungen</i>	161
Abbildung 5.25:	<i>Detailanalyse der Fahreinheiten und Automatisierungskomponenten</i>	162
Abbildung 5.26:	<i>Fahrzeugkonzeptspezifische Sensitivitätsanalyse der Ökobilanzierung</i> ... 164	
Abbildung 6.1:	<i>Übersicht der analysierten Publikationen</i>	170
Abbildung 6.2:	<i>Publikationsanalyse zur Markteinführung verschiedener SAE Level</i>	171
Abbildung 6.3:	<i>Roadmaps der Module Radar und Kamera</i>	174
Abbildung 6.4:	<i>Gesamt-Roadmap</i>	175
Abbildung 6.5:	<i>Disruptives Potenzial neuartiger Fahrzeugkonzepte</i>	182
Abbildung 7.1:	<i>Aggregiertes Ergebnis der ganzheitlichen Bewertung</i>	188
Abbildung G.1:	<i>Field of View der U-Shift-Sensorik</i>	262
Abbildung G.2:	<i>Rangiervorgänge beim Wechsel von Transporteinheiten durch U-Shift</i> ..	262
Abbildung G.3:	<i>Konzeption einer möglichen Paketstation</i>	263
Abbildung J.1:	<i>Herstellkosten bei steigender Produktionsmenge</i>	268
Abbildung K.1:	<i>Stoffstrommodell des Fahrzeugkonzepts U-Shift</i>	271
Abbildung K.2:	<i>Stoffstrommodell der Fahrzeugkonzepte Van und RoboVan</i>	272
Abbildung L.1:	<i>Roadmap aller Technologien</i>	288

Abkürzungsverzeichnis

AfA	Abschreibung für Abnutzung
AGV	Automated Guided Vehicle
AHP	Analytischer Hierarchieprozess
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
BEV	Battery Electric Vehicle
C2C	Consumer-to-Consumer
CA	Continuum-Approximation(-Analyse)
ci	conventional integral (Fahrzeugklasse)
CL	Citylogistik
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.
DoD	Depth of Discharge
DRT	Demand Responsive Transport
EG	Europäische Gemeinschaft
EMC	Eiermann-Campus
EoL	End of Life
ES	Einsatzszenario
EStG	Einkommenssteuergesetz
EZ	Einsatzzweck
FE	Fahrenheit ¹
FF	Forschungsfrage
FhG	Fraunhofer-Gesellschaft e. V.

¹ Die Begriffe „Fahrzeug“ und „Fahrenheit“ werden in dieser Arbeit synonym verwendet, wobei unter on-the-road integralen Fahrzeugen der untrennbare Verbund von Fahr- und Transporteinheit verstanden wird. Bei on-the-road modularen Fahrzeugen wird zwischen Fahr- und Transporteinheit unterschieden.

FK	Fahrzeugkonzept
fm	flexible mover (Fahrzeugklasse)
G	Gütertransport
GIS	Geoinformationssystem
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
GPU	Graphics Processing Unit
HGB	Handelsgesetzbuch
HU	Hauptuntersuchung
IBA	Internationale Bauausstellung
ibm	Infrastructure-based modular (Fahrzeugklasse)
IHK	Industrie- und Handelskammer
im	integral mover (Fahrzeugklasse)
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KEP	Kurier, Express, Paket
Kfz	Kraftfahrzeug
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KraftStG	Kraftfahrzeugsteuergesetz
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Costing
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
Lkw	Lastkraftwagen
MAS	Multi-Agenten-System
MIV	Motorisierter Individualverkehr
mPS	Mobile Paketstation
MRL	Manufacturing Readiness Level
n. a.	nicht anwendbar/ unzutreffend

Nfz	Nutzfahrzeug
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OEM	Original Equipment Manufacturer
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr
OR	Operations Research
OSM	OpenStreetMap
otri	on-the-road integral
otrm	on-the-road modular
ÖV	Öffentlicher Verkehr
P	Personentransport
p. a.	je Jahr (lat. per annum)
PDFK	Potenziell disruptives Fahrzeugkonzept
pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
POI	Point of Interest
PS	Paketstation
RCO	Relevant Cost of Ownership
RPE	Retail Price Equivalent
RV	Rangiervorgang
SAE	Society of Automotive Engineers
sam	standalone modular (Fahrzeugklasse)
TCO	Total Cost of Ownership
TE	Transporteinheit
tkm	Tonnenkilometer
TO	Teleoperator bzw. Teleoperatorin
TRL	Technology Readiness Level

TUL	Transportieren, Umschlagen und Lagern
UCC	Urban Consolidation Center
UStG	Umsatzsteuergesetz
VRP	Vehicle Routing Problem
VRS	Verband Region Stuttgart
WBF	Wohnbaufläche
WLTP	World Harmonized Light-Duty vehicle Test Procedure
WS	Workshop
x2C	x-to-Consumer (B2C & C2C)
zGG	Zulässiges Gesamtgewicht

Symbolverzeichnis

afa	betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer [Jahre]
AK	Anschaffungskosten [EUR]
α	Diskontierungsfaktor [-]
$BatK^a$	Batteriekosten p. a. [EUR]
$BatKap$	Batteriekapazität [kWh]
β	Funktionsparameter der Restwert-Funktion [-]
B_g	Gesamtzahl Güterbedarf je Tag [-]
$B_{p,max}$	max. Personen je Stunde im Tagesverlauf [-];
BZ^a	Betriebszeit p. a. [h]
C	Stopps je Tour [-]
CI	Konsistenzindex [-]
CR	Konsistenzfaktor [-]
d	Fahrstrecke [km]
δ	Stoppdichte [km ⁻²]
$dfak$	Dämpfungsfaktor [-]
DP	Disruptives Potenzial [-]
D_T	Tourlänge [km]
E	Fahr- oder Transporteinheit [-]
e	Erfüllungsgrad [-]
EG	Personal-Entgelt [EUR/h]
EnK^a	Energiekosten p. a. [EUR]
ε	Fuzzy-Skalierungsfaktor der Restwert-Funktion [-]
FE	Anzahl Fahreinheiten ¹ [-]
FL^a	Fahrleistung p. a. [km]
FL^{EoL}	Fahrleistung bis ans Lebensende [km]
G	Gemeinkosten [EUR]

g	Gewichtung [-]
γ	Lastanteil [-]
H	Haltezeit [Jahre]
HK	Herstellkosten [EUR]
i	Kalkulationszins [-]
I^D	Menge der Disruptionskriterien [-]
IHK^a	Instandhaltungskosten p. a. [EUR]
i_U	Unternehmenssteuersatz [-]
k	Nutzenkategorie [-]
K_g	Anzahl Kunden im Areal je Tag [-]
K_S	Anzahl Kunden je Stopp [-]
L	Ladefähigkeit [Güter oder Personen je Flotteneinheit]
LFK^a	laufende fixe Kosten p. a. [EUR]
LK^a	Laufende Kosten p. a. [EUR]
LNK	Lohnnebenkosten [-]
LR	Lernrate [-]
LVK^a	laufende variable Kosten p. a. [EUR]
m	Masse [kg]
MA	Fahrleistungsabhängiger Massenanteil [kg/km]
$Maut^a$	Mautkosten p. a. [EUR]
n_{FK}	Anzahl der zu vergleichenden Fahrzeugkonzepte [-]
n_K	Anzahl der Nutzenkriterien in einer Kategorie [-]
NP	Neupreis [EUR]
NW	Nutzwert [-]
NW_G	Gesamtnutzen [-]
n_{Ziel}	Anzahl Kunden bzw. Standorte je TE [-]
ω	Nutzenkriterium [-]

φ	Funktionsparameter der Restwert-Funktion [-]
PK^a	Personalkosten p. a. [EUR]
pka	Personalkostenanteil [-]
PM	Produktionsmenge [-]
ψ	Merkmal (für die Nutzenanalyse) [-]
ψ^*	gedämpftes Merkmal (für die Nutzenanalyse) [-]
RCO	Relevant Cost of Ownership [EUR]
RI	Zufallsindex [-]
RK^a	Reinigungskosten p. a. [EUR]
RW	Restwert [EUR]
$sBat$	Batteriepreis auf Packebene [EUR/kWh]
$sIHK$	spezifische Instandhaltungskosten [EUR/km]
St^a	Steuern p. a. [EUR]
StV	Steuervorteil [EUR]
Sub	Subvention [EUR]
SZ	Strafzahlung [EUR]
t_B	Betriebsstunden je Tag [h]
t_{BTE}	Beladedauer je TE [h]
t_D	Verweildauer im Depot je Tour [h]
TE	Anzahl Transporteinheiten [-]
T^{EoL}	Lebensdauer [Jahre]
ϑ	Auslastung [-]
t_H	Haltezeit [h]
TO_{Koeff}	Anzahl der durch 1 TO überwachte FE [-]
t_S	Dauer je Stopp [h]
t_T	Anteil der Transferzeit an einer Betriebsstunde [-]
t_{Tour}	Tourdauer [h]

USt	Umsatzsteuersatz [-]
v	Fahrgeschwindigkeit [km/h]
v_e	effektive Fahrgeschwindigkeit [km/h]
Ver^a	Versicherungskosten p. a. [EUR]
$ZuSt$	Zulassungssteuersatz [-]

1 Einleitung

Im Jahr 1950 lag der weltweite Anteil der urbanen Bevölkerung noch bei 30 %, heute liegt er bereits bei 55 % und gemäß einer Prognose der Vereinten Nationen werden im Jahr 2050 mehr als zwei Drittel der Weltbevölkerung in urbanen Räumen leben [1], in Europa voraussichtlich sogar über 80 % [2]. Dadurch werden einer Berechnung des Weltwirtschaftsforums zufolge im Jahr 2030 in den 100 größten Städten der Welt 36 % mehr Lieferfahrzeuge benötigt als im Jahr 2019. Zusätzlich steigt der Bedarf für urbane Personen- und Güterverkehre weltweit bis zum Jahr 2050 voraussichtlich um 150 % gegenüber 2015 [3]. Gleichzeitig verändern sich das Mobilitäts- (z. B. Shared Mobility, Mobility-as-a-Service) und das Konsumverhalten (z. B. Business-on-Demand, Bewusstsein für Klimawandel) der Bevölkerung, welche sich auf die urbanen Verkehre auswirken [4].

Diesen Veränderungen stehen ökonomische (z. B. Vermeidung von Schwerlastverkehr, Effizienz der Verkehre), ökologische (z. B. Lärmschutz, Luftreinhaltung) und soziale (z. B. Aufenthaltsqualität, Verkehrssicherheit) Ziele von Gesetzgeber und Kommunen entgegen [5–8]. Hierzu werden regulatorische Maßnahmen ergriffen, wie z. B. Umweltzonen, Lieferzeitfenster oder Anreize für eine erhöhte ÖPNV-Nutzung [6, 9, 10]. Flottenbetreiber reagieren mit angepassten Angeboten (z. B. On-Demand Verkehre, Flexibilität bei Zustellzeitpunkt) sowie auf Fahrzeugebene neben evolutionären Technologieverbesserungen zum einen mit einer Elektrifizierung der Flotte und zum anderen mit der Einführung fahrerloser Systeme [4]. Letztere stellen zugleich eine Lösung für den Mangel an Fahrpersonal dar [9, 11]. Außerdem wird in verschiedenen Forschungsarbeiten und Pilotprojekten der **kombinierte Transport von Personen und Gütern** untersucht, mit dem Ziel, urbane Verkehre effektiver und effizienter zu gestalten [4, 12–14]. Transportmittel im öffentlichen Personennahverkehr sind nach der maximal benötigten Kapazität in Hauptverkehrszeiten ausgelegt, um die Daseinsvorsorge zu gewährleisten. Dadurch ist ihre Auslastung in Schwachlastzeiten jedoch gering. Transportprozesse in der Logistik sind betriebswirtschaftlich gesteuert und darauf ausgelegt, Zustellzeiten verlässlich

bedienen zu können. Die Auslastung der systemischen Flotte könnte erhöht werden, wenn Fahrzeuge sowohl Personen als auch Güter transportieren [13, 15].

Neuartige Fahrzeuge für den Straßenverkehr entstehen durch die Wechselwirkung von Elektrifizierung, Automatisierung und Vernetzung [4]. Beispiele hierfür sind anwendungsoptimierte People und Cargo Mover für den Personen- oder Gütertransport, deren Fahrzeugarchitektur im Gegensatz zu Status quo-Fahrzeugen konsequent auf elektrisches und fahrerloses Fahren ausgelegt ist [16, 17]. Des Weiteren werden on-the-road modulare Systeme entwickelt, bei denen Fahreinheiten verschiedene Transporteinheiten im Betrieb wechseln und damit für verschiedene Einsatzzwecke eingesetzt werden können [13, 18]. Beispiele für on-the-road modulare Fahrzeugkonzepte² sind unter anderem Snap (Rinspeed) [20], U-Shift (DLR) [21] oder Pop.Up (Italdesign, Airbus) [22]. Diese neuartigen Fahrzeugkonzepte werden in der Regel fahrerlos und elektrisch betrieben und verändern operative Prozesse grundlegend. Die Einführung dieser neuartigen Fahrzeuge ermöglicht neue Transportprozesse im Personenverkehr sowie Zustellkonzepte im Güterverkehr und bietet ein erweitertes Serviceangebot für Kundinnen und Kunden. Für eine effektive Einbindung der Fahrzeuge in das urbane Transportsystem bedarf es aber angepasster Prozesse.

Es ist jedoch bisher unklar, welche der Fahrzeugalternativen für Anwendungsfälle im urbanen Verkehr besonders vorteilhaft sind. Aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge reicht eine eindimensionale Bewertung der Fahrzeuge nicht aus. Vielmehr müssen ein **ganzheitlicher Vergleich** verschiedener, neuartiger Fahrzeugkonzepte anhand eines Kriterienkatalogs vorgenommen und Status quo-Fahrzeuge in die vergleichende Bewertung mit einbezogen werden. Zudem müssen die Auswirkungen betrachtet

² Ein Fahrzeugkonzept, „der konstruktive Entwurf einer Produktidee“ [19, S. 130], definiert die „wesentlichen, die Fahrzeugeigenschaften und die Fahrzeugcharakteristik beeinflussenden Parameter, Hauptmodule und Komponenten“ [19, S. 130].

werden, die die Einführung neuartiger Fahrzeugkonzepte auf bestehende Transportprozesse hat.

Kriterien, die für die vergleichende Bewertung von Fahrzeugen relevant sind, werden von Harrington et al. (2016) und Krampe et al. (2012) in Ziele für Konsumenten, Industrie (Betreiber und Fahrzeughersteller) sowie Gesellschaft und Politik gruppiert [23, 24]. Die Ziele umfassen dabei ökonomische Kriterien, wie Investitionshöhe und Erlöse, ökologische Kriterien, wie Emissionsbelastung und Flächenbedarf, verkehrliche Kriterien, wie Verkehrsverzerrung und Straßenbelastung, sowie weitere Kriterien, wie z. B. Unfallsicherheit, Beeinträchtigung des Stadtbilds oder Barrierefreiheit [6, 8, 23–26].

Für die Planung künftiger Betriebsabläufe benötigen die Betreiber im urbanen Transportsystem Kenntnis darüber, wann neue Technologien und Fahrzeugkonzepte marktreif werden. Die Technologieverfügbarkeit ist demnach ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Bewertung von sich in der Entwicklung befindlichen Fahrzeugen [27, 28]. Zudem zeigt die Vergangenheit, dass die Einführung neuartiger Lösungen in einem etablierten Markt disruptive Ereignisse auslösen kann, sodass auch dieser Aspekt berücksichtigt werden muss [29, 30].

Im folgenden Kapitel wird zunächst der Stand der Forschung bezüglich existierender Bewertungsmethoden für neuartige Fahrzeugkonzepte anhand dieser Kriterien analysiert. Dabei wird aufgezeigt, welche Ansätze für die Bewertung neuartiger, on-the-road modularer Fahrzeugkonzepte bestehen und reflektiert, welche Ansätze für den Status quo und integrale Fahrzeugkonzepte verwendet werden.

1.1 Literaturanalyse zum Stand der Forschung

Für die Bewertung neuartiger, on-the-road **modularer Fahrzeugkonzepte** konnten nur wenige Forschungsarbeiten identifiziert werden. Diese widmen sich vor allem einer Optimierung der Tourenplanung, welche durch die Trennung von Fahr- und Transporteinheiten und variierende Einsatzzwecke im Personen- und Gütertransport anspruchsvoller ist als bei integralen Fahrzeugen oder Wechselbrückenkonzepten [13, 31–34].

Hatzenbühler et al. (2022), Meinhardt et al. (2022) und Österle et al. (2022) behandeln zudem Kostenaspekte als weiteres wichtiges Kriterium [13, 33, 35]. Die identifizierten Publikationen werden im Folgenden zusammengefasst:

- Meinhardt et al. (2022) sowie Schlenther et al. (2020) haben Ansätze zum Lösen des Optimierungsproblems der Tourenplanung (Vehicle Routing Problem, VRP) modularer Fahrzeuge im kombinierten Einsatz für Personen- und Pakettransport erarbeitet: Im Vergleich mit integralen Fahrzeugen sind die modularen Fahreinheiten durchschnittlich höher ausgelastet und ermöglichen damit Kostenreduktionspotenziale für Betreiber [32, 33].
- Hatzenbühler et al. (2022) haben ebenfalls das VRP modularer Fahrzeuge im Personen- und Güterverkehr untersucht. Die modulare Flotte benötigt dabei bis zu 40 % weniger Fahreinheiten und verursacht in einer ersten Kostenannahme weniger Kosten als eine Flotte fahrerloser, integraler Fahrzeuge [13]. Kortekaas et al. (2023) haben in einer numerischen Studie ermittelt, dass für ein generisches Szenario aus Personen- und Gütertransportaufgaben eine Flotte von on-the-road modularen Fahrzeugen ca. 20 % weniger Fahreinheiten benötigt als eine Flotte von integralen Fahrzeugen [34].
- Österle et al. (2022) haben die volkswirtschaftlichen Nutzen und Kosten verschiedener Automatisierungsansätze für modulare Fahrzeuge analysiert: eine infrastrukturbasierte Automatisierung verursacht weniger Kosten für Sensorik und Computing im Fahrzeug als eine fahrzeuggestützte Automatisierung, bedarf aber hoher Anfangsinvestitionen in die Infrastruktur, gemeinsamer Standards und kontinuierlicher Instandhaltungsarbeiten [35].
- Schwerdfeger und Boysen (2022) haben verschiedene Zustellkonzepte integraler und modularer Fahrzeuge anhand verkehrlicher Kennzahlen verglichen. Ein Einsatz quasi-stationärer Paketstationen auf modularen Fahrzeugen resultiert demnach in weniger Fahreinheiten, aber mehr Paketstationen als im Einsatz mobiler Paketstationen [31].

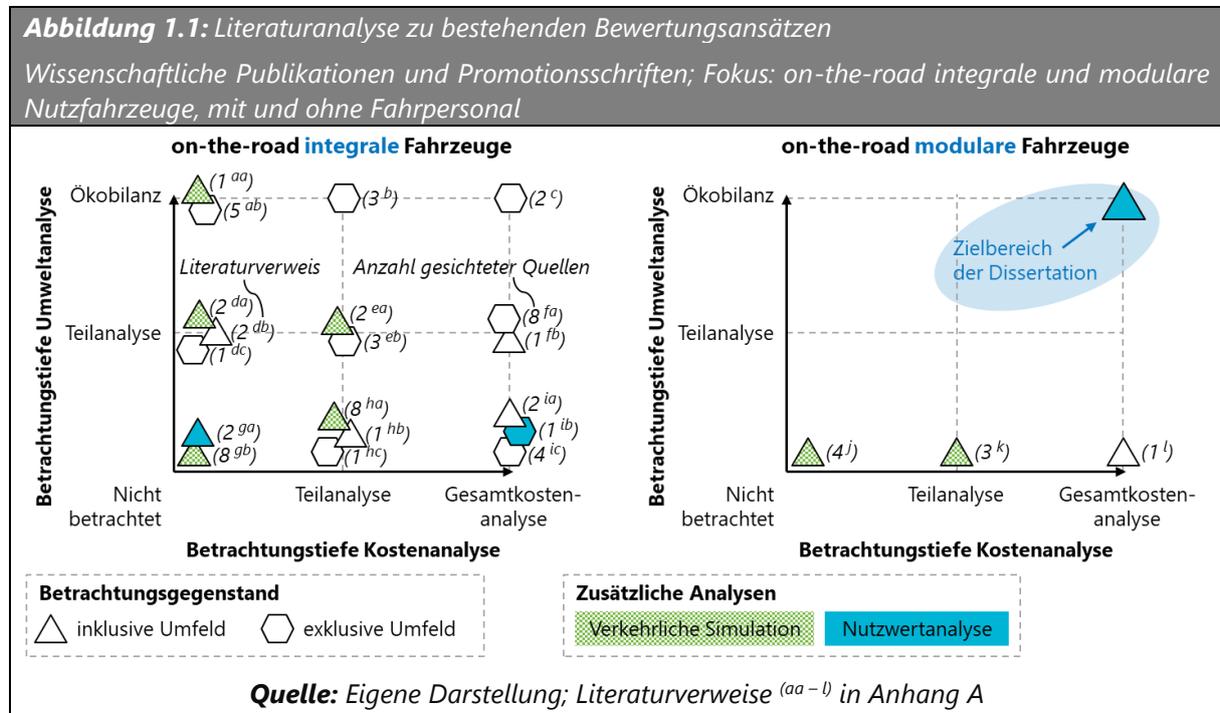
Während die bisherigen Publikationen demnach ausschließlich verkehrliche Kenngrößen und teilweise Kosten untersuchen, fehlen bislang Forschungsarbeiten, die on-the-road modulare Fahrzeugkonzepte anhand der anderen als relevant identifizierten Kriterien (z. B. ökologische Kriterien und Nutzenkriterien) bewerten.

Verschiedene Forschungsarbeiten analysieren dagegen on-the-road **integrale Fahrzeuge**, zu denen Status quo-Fahrzeuge sowie deren fahrerlose Pendanten gehören, hinsichtlich unterschiedlicher Dimensionen. Neben qualitativen Entscheidungsanalysen (z. B. Nutzwertanalyse) [36–38] wurden vor allem Untersuchungen zu ökologischen, ökonomischen und verkehrlichen Kenngrößen publiziert. Eine für diese Arbeit relevante Auswahl an Arbeiten wird im Folgenden skizziert, während ein umfassender Überblick bei der methodischen Entwicklung in Kapitel 4 erfolgt.

- Kleiner (2020) hat eine vergleichende Bewertung alternativer Antriebskonzepte anhand einer Gesamtkosten- und Nutzwertanalyse durchgeführt, um daraus den Markthochlauf elektrifizierter Nutzfahrzeuge zu simulieren. Zudem wurden CO₂-Emissionen für den sich entwickelnden Gesamtmarkt abgeleitet [37].
- Bösch (2018) hat den Einfluss automatisierten Fahrens auf die Kostenstruktur im öffentlichen Personennahverkehr untersucht und eine signifikante Kostenreduktion durch die Einsparung des Fahrpersonals herausgearbeitet [39].
- Gawron et al. (2018) haben in einer Ökobilanz fahrerloser Fahrzeuge berechnet, dass die Automatisierung zunächst höhere Umweltwirkungen verursachen, diese aber potenziell durch eine effizientere Fahrweise kompensiert werden können [40].
- Beirigo et al. (2018), Mourad (2019) sowie Fehn et al. (2022) haben im Forschungsfeld des Operations Research Ansätze untersucht, um die Tourenplanung kombinierter Transporte von Gütern und Personen in integralen Fahrzeugen zu optimieren [14, 41, 42].

Abbildung 1.1 zeigt den unterschiedlichen Stand der Forschung für die Bewertung on-the-road integraler sowie modularer Fahrzeuge nach den in der Literatur hauptsächlich

angewendeten Methoden und Randbedingungen. Diese umfassen Umwelt- und Kostenanalysen in verschiedenen Betrachtungstiefen sowie Nutzwertanalysen und verkehrliche Simulationen.



Für integrale Fahrzeuge existieren demnach bereits weitgehende Forschungsarbeiten zu verschiedenen Bewertungsdimensionen. Dagegen besteht eine signifikante **Forschungslücke** für die Bewertung neuartiger, on-the-road modularer Fahrzeugkonzepte, womit auch eine vergleichende Bewertung dieser modularen Konzepte mit integralen Lösungen bislang nicht möglich ist.

Neben diesen Bewertungskriterien wurden Aussagen zur Technologieverfügbarkeit und zum disruptiven Potenzial im vorherigen Abschnitt (S. 3) als weitere wichtige Kriterien identifiziert. Für die Prognose der prospektiven Technologieverfügbarkeit existieren in der Literatur vereinzelte Ansätze, z. B. Publikations- und Patentanalysen [43–45] sowie Szenarioanalysen [46] für die Entwicklung des automatisierten Fahrens. Diese unterliegen jedoch stets prognosedingten Unsicherheiten [45]. Während andere Branchen bereits umfangreich in der Disruptionstheorie behandelt wurden [30, 47–49], existiert bisher vergleichsweise wenig Literatur zu Disruptionen im Fahrzeugbereich und

keine Vorgehensweise mit der das disruptive Potenzial neuartiger Fahrzeuge ex-ante ermittelt werden kann.

Aus der Analyse des aktuellen Forschungsstands geht hervor, dass bislang keine Methodik zur Bewertung neuartiger, on-the-road modularer Fahrzeugkonzepte anhand eines umfassenden Kriterienkatalogs unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen mit unterschiedlichen Einsatzszenarien existiert. Auch ein Vergleich mit integralen Fahrzeugen fehlt. Des Weiteren ist ein Vorgehen erforderlich, mit dem die prognosebedingten Unsicherheiten bei Aussagen zur prospektiven Technologieverfügbarkeit verringert werden können und das disruptive Potenzial neuartiger Fahrzeuge ex-ante ermittelt werden kann.

1.2 Zielsetzung und adressierte Forschungsfragen

Aufgrund der im vorherigen Kapitel identifizierten Forschungslücke einer fehlenden Methodik zur Analyse, Bewertung und Potenzialabschätzung neuartiger Fahrzeugkonzepte unter Berücksichtigung von Einsatzszenarien, können die folgenden **Forschungsfragen (FF)** nur unzureichend beantwortet werden.

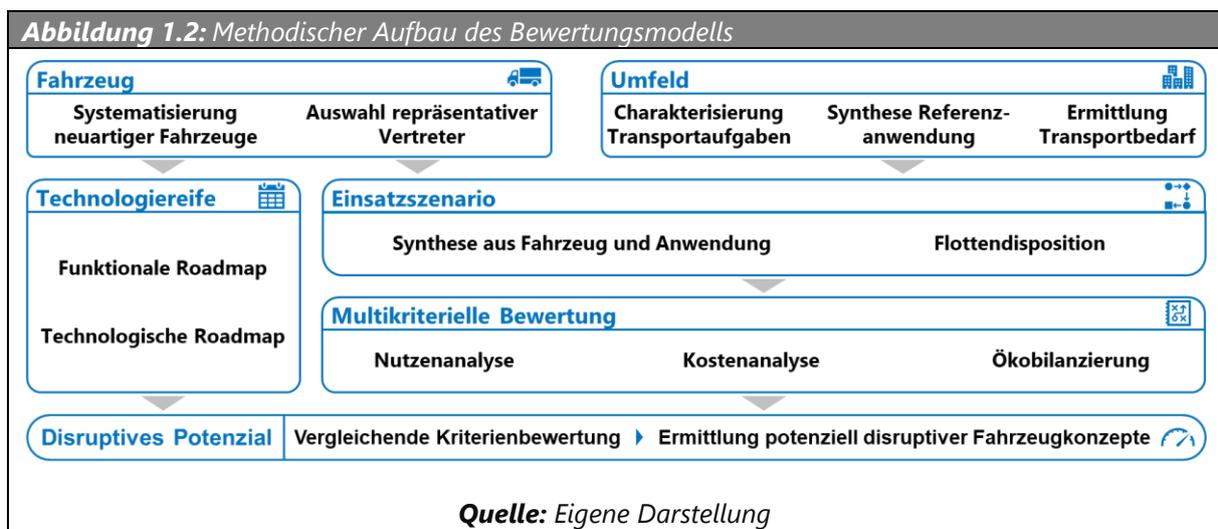
- *FF1*: Welche neuartigen Fahrzeugkonzepte sind aktuell am Markt bekannt und wie können diese klassifiziert werden?
- *FF2*: Wie können unterschiedliche, on-the-road integrale und modulare sowie fahrerlose Fahrzeugkonzepte einheitlich und ganzheitlich vergleichend bewertet werden?
- *FF3*: In welchen Einsatzszenarien des urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehrs sind diese vorteilhaft?
- *FF4*: Welche technischen Hürden verzögern die Marktreife der neuartigen Fahrzeugkonzepte und wann sind diese voraussichtlich überwunden?
- *FF5*: Wie hoch ist das Potenzial neuartiger Fahrzeugkonzepte, den etablierten Status quo zu ersetzen?

Deshalb ist es erforderlich und das übergeordnete **Ziel dieser Arbeit**, eine Methodik zur ganzheitlichen Bewertung neuartiger, on-the-road integraler sowie modularer Fahrzeugkonzepte im urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehr zu entwickeln.

Im Einzelnen müssen zunächst neuartige Fahrzeugkonzepte sowie das Umfeld des urbanen Wirtschaftsverkehrs charakterisiert werden. Dieser Input ist notwendig, um das zu entwickelnde Bewertungsmodell anwenden zu können. Die Bewertung muss anhand der als relevant identifizierten Kriterien erfolgen: verschiedene Nutzenkriterien, ökonomische und ökologische Kenngrößen, verkehrliche Kennzahlen, die Technologiereife und das disruptive Potenzial. Essentiell ist, dass das Bewertungsmodell sowohl für neuartige, on-the-road integrale als auch modulare Fahrzeugkonzepte eingesetzt werden kann und einen Vergleich mit Status quo-Fahrzeugen zulässt. Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung müssen die Fahrzeugkonzepte auf Flottenebene in ihrer Wechselwirkung mit Einsatzszenarien bewertet werden.

1.3 Konzeption eines Bewertungsmodells

Um das Ziel dieser Arbeit zu erreichen und die Forschungsfragen beantworten zu können, wird der in Abbildung 1.2 dargestellte methodische Aufbau für ein **ganzheitliches Bewertungsmodell konzipiert**. Dieser wird im Folgenden näher beschrieben und begründet.



Im ersten Schritt müssen die neuartigen Fahrzeugkonzepte in Fahrzeugklassen systematisiert werden, um Klassen-spezifische Charakteristika zu identifizieren. Damit können repräsentative Fahrzeugvertreter ausgewählt werden, für welche später eine Bewertung vorgenommen wird. Da sich durch die Einführung neuartiger Fahrzeugkonzepte die operativen Prozesse und Randbedingungen des Transportsystems ändern können, müssen zusätzlich das Umfeld urbaner Personen- und Güterwirtschaftsverkehre charakterisiert und daraus Referenzanwendungen mit ihren jeweiligen Transportbedarfen abgeleitet werden.

Konkrete Einsatzszenarien beschreiben, wie die Fahrzeuge die Transportbedarfe lösen. Damit können im nächsten Schritt verkehrliche Kennzahlen, wie Flottengröße und Fahrleistung, mittels einer Dispositionsrechnung ermittelt werden. Eine Betrachtung gesamter Flotten statt einzelner Fahrzeuge stellt sicher, dass potenzielle Effizienzvorteile konzeptspezifischer Einsatzmöglichkeiten berücksichtigt werden.

Die Durchführung einer Nutzenanalyse ist besonders geeignet, die Vielfalt der in den vorherigen Kapiteln identifizierten Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugalternativen zu erfassen. Diese muss das komplexe System aus Fahrzeug und Umfeld erfassen, die Ergebnisse transparent darstellen und gleichzeitig eine hohe Validität ermöglichen.

Für nachhaltige Transportsysteme definieren die Vereinten Nationen (2012) in den Zielen für eine nachhaltige Entwicklung (SDG) ökonomische, ökologische und soziale Kriterien als besonders wichtig [50]. Für eine erhöhte Aussagekraft der Bewertung bei der ökonomischen und ökologischen Dimension ist eine daten- und faktenbasierte Berechnung erforderlich. Soziale Kriterien, als dritte Dimension, sind in der Nutzenanalyse berücksichtigt.

Die ökonomische und ökologische Bewertung benötigt die quantitativen Ergebnisse der Einsatzszenarien als wichtige Eingangsgrößen. Dabei ist die Berechnung der Kosten ein wesentlicher Aspekt für eine ökonomische Analyse. Um bei der ökologischen Analyse verschiedene Umweltfaktoren, wie in Tabelle K.1 dargestellt, zu berücksichtigen,

muss eine vollständige Ökobilanzierung anstelle von anderen Bewertungsansätzen, wie z. B. CO₂-Bilanzen, durchgeführt werden.

Die Technologieentwicklung ist insbesondere von den Fahrzeugspezifikationen abhängig, sodass die prospektive Technologieverfügbarkeit parallel zu den vorherigen Schritten ermittelt werden kann. Hierzu werden in dieser Arbeit eine technologische und eine funktionale Roadmap entwickelt. Durch eine geeignete Aggregation der beiden Roadmaps zu einer Gesamt-Roadmap können die prognosebedingten Unsicherheiten reduziert werden.

Das disruptive Potenzial ist sowohl für neue als auch am Markt etablierte Unternehmen von strategischer Bedeutung (S. 3). Deshalb besteht der Anspruch in dieser Arbeit darin, das disruptive Potenzial neuartiger Fahrzeugkonzept zu ermitteln. Hierzu wird die Disruptionstheorie auf den Fahrzeugbereich angewendet und ein neuer Indikator zur Bestimmung des disruptiven Potenzials eingeführt.

Das Bewertungsmodell wird für Fahrzeugkonzepte des straßengebundenen urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehrs entwickelt³ und geht für die vergleichende Bewertung davon aus, dass alle untersuchten Fahrzeugkonzepte zum Betrachtungszeitpunkt marktreif⁴ sind.

1.4 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit folgt der methodischen Konzeption des Bewertungsmodells und wird um eine beispielhafte Anwendung des Modells ergänzt. In Kapitel 2 erfolgt zunächst eine Beschreibung von Technologietrends und eine Einteilung neuartiger Fahrzeugkonzepte in neue Fahrzeugklassen anhand von Flexibilisierungs- und

³ Der motorisierte Individualverkehr, Konzepte der Langstrecke (z. B. Oberleitungs-Lkw) sowie Transportkonzepte anderer Verkehrsträger (z. B. Flugdrohne) werden nicht betrachtet.

⁴ Technische Voraussetzungen werden als eingeführt, sowie rechtlich und gesellschaftlich akzeptiert angenommen.

Modularisierungsstrategien. In Kapitel 3 wird das Einsatzumfeld des urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehrs charakterisiert. Anschließend werden mögliche Einsatzszenarien im kombinierten Transport von Personen und Gütern durch die Zusammenführung der Fahrzeug- und Umfeldbetrachtung hergeleitet.

Als Kern der Arbeit erfolgt in Kapitel 4 die Entwicklung eines neuen Bewertungsmodell entsprechend Abbildung 1.2. Zunächst wird ein Vorgehen erarbeitet mit dem die Transportbedarfe der Einsatzszenarien berechnet werden können. Zur Ermittlung der für die Durchführung der Transporte benötigten Flotteneinheiten wird ein Formelsatz hergeleitet. Für die Nutzenanalyse werden Expertinnen und Experten eingebunden und die Kombination aus Nutzwertanalyse und AHP formalisiert. Der Relevant Cost of Ownership-Ansatz wird für eine Flottenbetrachtung neuartiger Fahrzeuge angepasst und die Ökobilanzierung derart modelliert, dass sowohl on-the-road integrale als auch modulare Fahrzeuge einheitlich bewertet werden können. Zudem wird in dem Kapitel eine Vorgehensweise zur Ableitung der Technologieverfügbarkeit und des disruptiven Potenzials entwickelt. Bei der Entwicklung des Bewertungsmodells werden zu allen Aspekten die jeweils relevanten Publikationen aus dem Stand der Forschung berücksichtigt. Dadurch werden die verwendeten methodischen Grundlagen begründet und abgesichert sowie darauf aufbauend weiterentwickelt.

In den Kapiteln 5 und 6 wird das Bewertungsmodell für Vertreter der ermittelten Fahrzeugklassen anhand eines beispielhaften Einsatzzwecks angewendet und durch Sensitivitäts- und Plausibilitätsprüfungen validiert.

Abschließend werden in Kapitel 7 die Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst, die Forschungsfragen beantwortet, Limitationen der Arbeit aufgezeigt und ein Ausblick auf weiterführenden Forschungsbedarf gegeben.

2 Neuartige, on-the-road modulare Fahrzeugkonzepte

Andersartige Transportkonzepte für den Personen- und Güterverkehr zu Land, zu Wasser und in der Luft werden in dem folgenden Kapitel beschrieben, um verkehrsträgerübergreifende Trends zu identifizieren. Anschließend werden aus verschiedenen Flexibilisierungs- und Modularisierungsstrategien neue Fahrzeugklassen für Konzepte im Straßenverkehr abgeleitet und charakterisiert. Anhand dieser Klassen wird das in Kapitel 4 entwickelte Bewertungsmodell angewendet.

2.1 Technologietrends und neue Transportkonzepte

Verkehrsträgerübergreifend finden sich Entwicklungen, die die bisherigen Transportkonzepte verändern. Entwicklungen im **Straßenverkehr** umfassen neben neuen Betriebskonzepten, wie der Sharing-Economy [51],

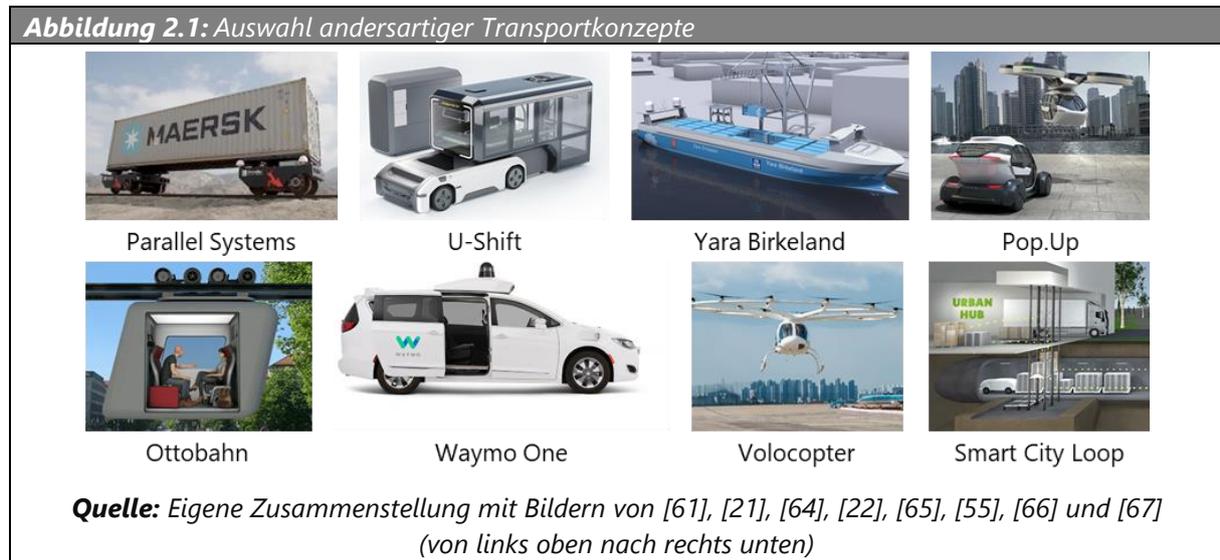
- die Elektrifizierung der Fahrzeuge (z. B. Mercedes-Benz eSprinter [52]),
- das assistierte Fahren mit der Entwicklung hin zu teleoperiertem oder fahrerlosem Fahren (z. B. Mercedes-Benz DRIVE PILOT [53], Einride Teleoperation [54], Waymo One in Abbildung 2.1 [55]),
- Mover-Konzepte im Purpose Design (Zweck-optimierte Neuentwicklung) statt einer Anpassung konventioneller Fahrzeuge (z. B. MOOVE People Mover L4 [56])
- eine konsequente Modularisierung in der Produktion (z. B. Urban Modular Vehicle (DLR) [57]) und
- eine Modularisierung im Betrieb (z. B. DLR U-Shift, Abbildung 2.1 [21]).

Ein kombinierter Transport wird im **Schieneverkehr** eingesetzt, um Verkehre von der Straße auf die Schiene zu verlegen. Bei der rollenden Landstraße (RoLa, bzw. engl. Roll-on/Roll-off RoRo) werden Lkw inklusive Sattelaufleger auf Zugwaggons verladen. Allerdings werden dafür spezielle Niederflurwaggons mit kleineren Rädern oder Taschenwaggons benötigt. Durch die Mitführung der Zugmaschinen steigert sich der Totlastanteil des Systems [58]. Als Alternative zur RoLa werden nur die Sattelaufleger mit

einem Kran auf die Waggons verladen. Entwicklungen, diesen Status quo zu verändern, sind unter anderem

- die Verladung der Sattelaufleger mit anderen Lösungen: z. B. Flexiwaggon [59] oder RailRunner [60],
- selbstfahrende, batterieelektrische Module zum Transport einzelner Container: Parallel Systems [61] (Abbildung 2.1),
- Elektrifizierung konventioneller Dieseltriebzüge (batterieelektrisch oder mit Brennstoffzellen) [62] und eine
- gesteigerte Intermodalität durch die Kopplung einzelner Waggons an Flugzeuge (Konzeptstudie von AKKA: Link&Fly) [63].

Abbildung 2.1: Auswahl andersartiger Transportkonzepte



Röhrenbasierte, unter- oder oberirdische Konzepte umfassen unter anderem

- röhrenbasierte Warenverteilsysteme (z. B. Smart City Loop, Abbildung 2.1 [67]) für den unterirdischen Transport von Gütern in die Stadt,
- unterirdische Tunnel für selbstfahrende Fahrzeuge bzw. Pods für konventionelle Pkw (Boring Company [68]) und
- evakuierte Rohrpostsysteme mit Personen- und Güterkapseln für schnellen Transport (Hyperloop) [69].

Elektrifizierte Drohnen für den **Luftverkehr** zum Einsatz als Personen- oder Güter-Shuttle werden für den urbanen Einsatz entwickelt (z. B. Volocopter, Abbildung 2.1 [66]). Neben der Konzeptstudie Link&Fly von AKKA [63], die den Verkehrsträger Luft mit Schienenfahrzeugen verbindet, kombiniert das Pop.Up-Konzept (Abbildung 2.1) [22] ein modulares Straßenfahrzeug mit einer Drohne für den intermodalen Wechsel zwischen Straße und Luft. Dieselbe Kombination, aber als hybrides Konzept aus Fahrzeug und Flugzeug verfolgt das Konzept AirCar [70]. Die RWTH Aachen entwickelt mit UpBus eine Kombination aus **Seilbahn** und modularem Straßenfahrzeug [71], ebenso Leitner mit ConnX [72]. Ottobahn führt Gondeln entlang von Schienen-Hochtrassen durch die Stadt, um den Verkehrsträger Straße zu entlasten (Abbildung 2.1). Die Gondeln werden über ein Seilsystem auf Straßenebene abgesenkt [65].

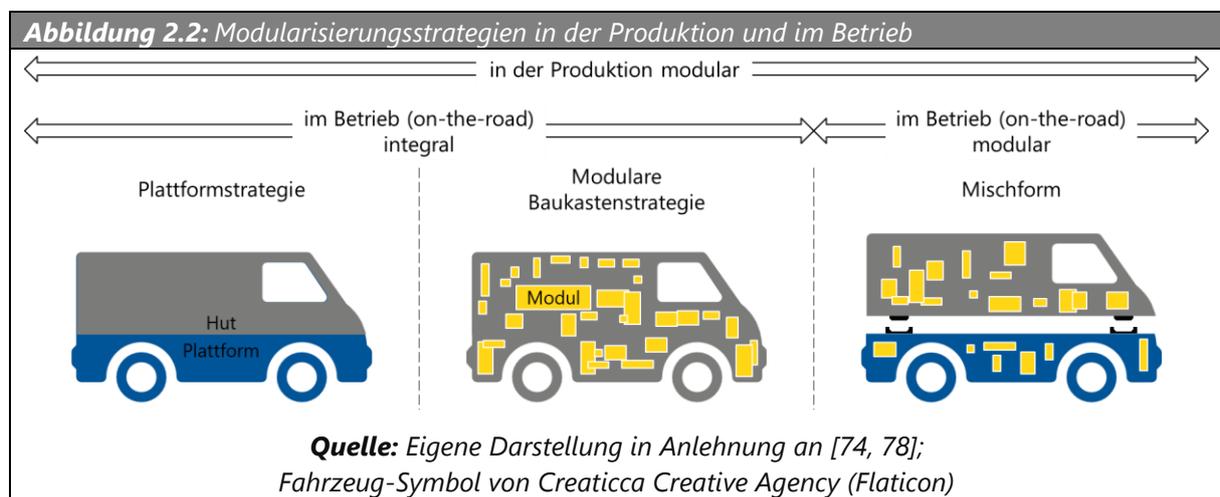
Auch die **Schifffahrt** wird elektrifiziert: Fleetzero entwickelt z. B. ein Konzept bei dem Batterien in Frachtcontainern das elektrische Schiff mit Energie versorgen. Die Batterie-Container werden während des Güterumschlags ausgetauscht. Das Güterschiff Yara Birkeland (Abbildung 2.1) wird elektrisch und zudem automatisiert betrieben. Das Ziel ist eine autonome Binnenschifffahrt [64].

Gemäß der Analyse aktueller Entwicklungen sind die Elektrifizierung und Automatisierung ebenso wie intermodale Verkehre verkehrsträgerübergreifende Trends. Zudem wird vor allem bei straßengebundenen Konzepten eine Modularisierung verfolgt. Die modularen Straßenfahrzeuge werden in den folgenden Kapiteln charakterisiert.

2.2 Klassifizierung neuartiger Fahrzeugkonzepte

Die beschriebenen Technologietrends verändern die Fahrzeugkonzepte im Straßenverkehr zum Teil grundlegend. In dieser Arbeit werden die Auswirkungen insbesondere der verschiedenen Modularisierungsstrategien auf die Fahrzeuge untersucht. Daraus werden neue Fahrzeugklassen erarbeitet, da bestehende Schemata zur Klassifizierung unzureichend sind, um die verschiedenen neuartigen Fahrzeugkonzepte zu erfassen.

Im Fahrzeugbau haben sich historisch betrachtet verschiedene Strategien für die Produktionsphase bis zum Austritt des Fahrzeugs aus dem Werk etabliert: unter anderem die **Plattform- und Baukastenstrategie** [16, 73, 74]. Ziel der Strategien sind minimale Entwicklungs- und Investitionskosten bei einer Maximierung von Varianten durch Verbund- und Skaleneffekte (economies of scope & scale) [19, S. 156, 75, S. 161, 76, S. 64]. Z. B. stieg die Anzahl der Derivate je Plattform bei der Volkswagen AG von 350.000 Fahrzeuge je Plattform im Jahr 2000 auf 1,1 Mio. in 2020 und bei der BMW AG von 200.000 auf 615.000 [Lazard, 2014 zitiert nach 74, S. 30]. Bei der Plattformstrategie wird zwischen dem Gleichteil „Plattform“ (bzw. Fahrereinheit), welches Fahrwerk, Antrieb und Elektrik umfasst, und einem „Hut“ (bzw. Transporteinheit), bestehend aus Exterieur und Interieur, unterschieden [16, S. 23–24, 74, S. 25–27, 77, S. 40–43]. In der Baukastenstrategie werden Baugruppen und Komponenten in unterschiedlichen Fahrzeugtypen und -baureihen verwendet [19, S. 156, 77, S. 47–49]. Synergien werden bei der Plattformstrategie innerhalb einer Fahrzeugklasse erzielt, bei der Baukastenstrategie über Fahrzeugklassen hinweg [74, S. 26, 78]. Die Modularisierungsstrategien sind in Abbildung 2.2 dargestellt.



Nach Verlassen des Werks sind bei beiden Produktionsphilosophien die Fahrzeuge fest verbunden, d. h. im Betrieb integral. Andere Konzepte sehen eine durchgängige **Trennung verschiedener Module auch im Betrieb** vor [13, 16, 79]: rechte Darstellung in

Abbildung 2.2. Diese werden in vorliegender Arbeit als on-the-road, d. h. im Betrieb, modular bezeichnet (otrm). Andere Quellen nennen diese Strategie „on-the-fly modular“ [16, S. 200]. Im Betrieb kann die Verbindung gelöst, eine andere Transporteinheit aufgenommen und die Fahreinheit für einen anderen Einsatzzweck verwendet werden. Technisch sind verschiedene Möglichkeiten der Schnittstellen und Wechselkonzepte möglich: z. B. als „Skateboard-Hut“ Variante, als U-förmige Fahreinheit welche die Transporteinheit aufnimmt oder als zwei autonome Antriebsachsen, welche sich seitlich an die Transporteinheit koppeln [16, S. 199–201]. Eine grundlegende Unterscheidung liegt darin, ob das Wechselkonzept zusätzlicher Infrastruktur bedarf (z. B. Kran) oder ob es den Wechsel ohne externe Hilfsmittel durchführen kann.

Im Betrieb modulare (otrm) Fahrzeuge können durch den Wechsel einsatzoptimierter Transporteinheiten für verschiedene Anwendungen, sowohl im Güter- als auch Personentransport, eingesetzt werden. Der Wechsel kann zudem zu einer Änderung der Gesamtmasse führen. Deshalb können otm Fahrzeuge nicht in bestehende Klassifizierungsschemata, wie die EG-Fahrzeugklassen, eingeteilt werden, welche vorwiegend nach Einsatzzweck (Personen oder Güter) und zulässiger Gesamtmasse differenzieren [80]. Für die Erfassung der otm Fahrzeuge sowie weiterer neuartiger Konzepte wird daher die Notwendigkeit einer **neuen Fahrzeugklassifizierung** abgeleitet. Um diese zu erarbeiten, wird zunächst die bisherige Einteilung der Transportmittel skizziert: Die Unterscheidung erfolgt hierarchisch nach den genutzten Verkehrsträgern (Land, Luft, Wasser), nach der Transportrichtung (überwiegend horizontal oder vertikal), ob der Transport geführt oder ungeführt erfolgt sowie nach dem Verkehrsbereich, in dem das Transportmittel operiert (innerbetrieblicher Verkehr oder Mischverkehr). Der Mischverkehr ist demnach ein ungeführter, horizontaler und oberirdischer Landverkehr [24, S. 45, 81]. Für den Bereich der straßengebundenen Transportmittel im Mischverkehr wird in dieser Arbeit die bestehende Klassifizierung erweitert. Anders als die EG-

Fahrzeugklassifizierung orientiert sich diese nicht an der Produktionsphase, sondern - an der Betriebsphase, um auch otrm Konzepte zu berücksichtigen:

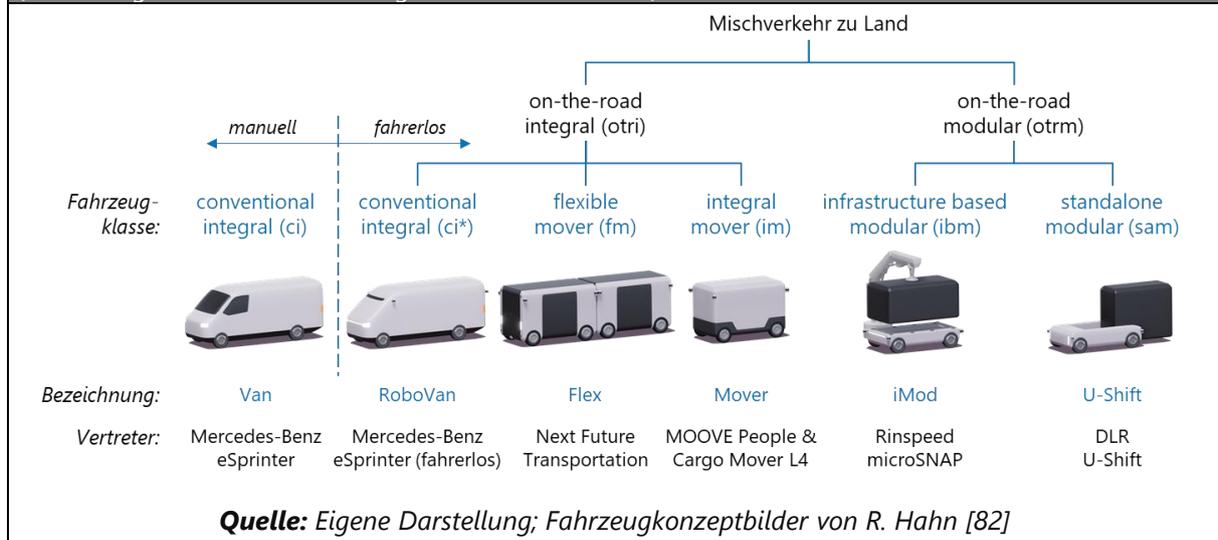
- Zunächst wird zwischen on the-road integralen (otri) und on-the-road modularen (otrm) Fahrzeugen unterschieden. Des Weiteren werden die integralen Fahrzeuge in konventionell aufgebaute Fahrzeuge (conventional integral, ci: Status quo), flexible Mover (fm) und integrale Mover (im) differenziert.
- Bei den modularen Ansätzen definiert das Wechselkonzept die beiden Unterklassen: mit Infrastrukturunterstützung (infrastructure-based modular, ibm) oder ohne (standalone modular, sam).
- Alle Fahrzeugklassen werden zudem nach dem Einsatzzweck weiter differenziert. Die Einteilung nach Personen- oder Gütertransport, die bereits in der EG-Fahrzeugeinteilung in Klasse M und N angewendet wird [80], wird um einen universalen Einsatzzweck ergänzt. Dieser steht für den Einsatz in Personen-, Güter- oder Dienstleistungsanwendungen.
- Eine Einteilung nach der Fahrzeugmasse findet keine Anwendung, da neuartige Fahrzeuge je nach gekoppelter Transporteinheit unterschiedlichen Klassen zugeordnet werden müssten.

2.3 Charakterisierung von Fahrzeugklassen und repräsentativer Vertreter

Entsprechend der Klassifizierung aus vorherigem Kapitel werden die abgeleiteten Fahrzeugklassen in diesem Kapitel beschrieben und die am Markt oder in der Literatur bekannten, neuartigen Fahrzeugkonzepte diesen Klassen zugeordnet. Zudem werden repräsentative Fahrzeuge für alle fünf Klassen sowie für den Status quo als Referenz ausgewählt und als generische Vertreter der Fahrzeugklassen charakterisiert: Abbildung 2.3. Die Fahrzeugvertreter werden entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit für eine vergleichende Bewertung herangezogen und müssen daher eine ähnliche Größe aufweisen. Alle Fahrzeuge sind batterieelektrisch und bis auf den Status quo fahrerlos.

Abbildung 2.3: Fahrzeugkonzept-Vertreter der Fahrzeugklassen

Fahrzeugklassen werden in Anlehnung zu den gängigen Begriffen *People Mover* und *Cargo Mover* ebenfalls in Englisch benannt; die dargestellten Vertreter befinden sich in derselben Größenklasse



Die **conventional integral** (ci) Fahrzeuge repräsentieren den Status quo. Bei dieser Fahrzeugklasse wird zwischen einem Betrieb mit Fahrpersonal (ci entspricht dem Status quo) und einem fahrerlosen Betrieb (ci*) unterschieden. Letzterer stellt eine mögliche Transition der Status quo-Fahrzeuge zu einer Vollautomatisierung dar. Die Fahrzeuge kennzeichnet eine integrale Architektur, bestehend aus einer Fahreinheit inklusive Fahrkabine und einer Transporteinheit. Beispielhafte Vertreter sind konventionelle Pkw und Nutzfahrzeuge sowie deren automatisierte Pendanten. Die Klasse wird durch den Mercedes-Benz eSprinter [52] charakterisiert. Die Sprinter-Modellreihe hatte zusammen mit dem Ford Transit und dem Volkswagen Transporter die meisten Neuzulassungen in Deutschland und Europa im Jahr 2020 [83, 84]. Die Sprinter-Fahrzeuge werden sowohl für Güteranwendungen als auch im Personenverkehr eingesetzt. Eine statistische Auswertung der technischen Spezifikation auf dem Markt verfügbarer Fahrzeugmodelle ist in Anhang B dargestellt. Die EG-Fahrzeugklasse N1 (Nutzfahrzeuge bis 3,5 t zulässige Gesamtmasse) wird in der Fachliteratur häufig als „Sprinter-Klasse“ bezeichnet [85]. Im Englischen umfasst der Begriff „Van“ Kleintransporter, wie z. B. den Mercedes-Benz Sprinter [86]. Das generische Status quo-Fahrzeug wird in dieser Arbeit entsprechend **Van** genannt und das fahrerlose Pendant **RoboVan** bezeichnet.

Die **flexible Mover** (fm) reihen mehrere integrale Einheiten in einem Platoon⁵ aneinander (z. B. i-Cristal der Lohr Gruppe für Personen [88] oder Auto Duck von Ducktrain für Güter [89]) oder koppeln diese physisch wie Zugwaggons wodurch sich Durchgangsschleusen bilden (z. B. Next Future Transportation für Personen und Güter [90]). Durch die Kopplung können Personen und Güter während der Fahrt auf die Einheiten verteilt werden. Im Platoon wird die systemische Effizienz des Konzepts optimiert, während der Komfort für Kunden durch die Flexibilität der einzelnen Einheiten gesteigert wird. Weitere Beispiele sind in der Marktübersicht in Tabelle C.1 aufgeführt (Anhang C). Basierend auf Next Future Transportation [90] repräsentiert das generische Fahrzeug **Flex** die fm-Fahrzeugklasse. Das Fahrzeug wird zunächst für den Personentransport entwickelt; es wurden aber auch bereits konzeptionelle Spezifikationen für den Gütertransport veröffentlicht.

Integral Mover (im) sind anwendungsoptimierte Fahrzeuge und werden häufig als People oder Cargo Mover bezeichnet. Sie basieren in der Regel auf einer Modulstrategie in der Produktion und können damit verschiedene Transporteinheiten auf eine einheitliche Fahreinheit fixieren. Die Verbindung kann im Betrieb nicht mehr getrennt werden. In den letzten Jahren wurden verschiedene People und Cargo Mover entwickelt und erprobt. Einige wenige sehen Fahrpersonal vor, die meisten werden fahrerlos betrieben. Ein vielfach in Reallaboren eingesetzter People Mover ist das Navya Shuttle [91]. Tabelle C.1 zeigt weitere integrale Mover. Die beiden fahrerlosen Fahrzeugkonzepte People Mover L4 [56] und Cargo Mover 11 L4 [92] der MOOVE GmbH stehen stellvertretend für die Klasse der integralen Mover, die in der weiteren Arbeit kurz als **Mover** genannt wird.

Bei den **infrastructure-based modular Fahrzeugkonzepten** (ibm) werden stationäre Roboter (z. B. Rinspeed microSNAP [20]) oder mobile Roboter eingesetzt (z. B. Pop.Up

⁵ auch „elektronische Deichsel“: automatisierte Fahrzeuge fahren digital gekoppelt sehr eng hintereinander [87].

von Italdesign und Airbus [22] oder Rinspeed MetroSnap [93, 94]), um verschiedene Transporteinheiten auf der Fahreinheit zu fixieren. Die Transporteinheit kann im Betrieb (on-the-road) jederzeit gewechselt werden, sofern eine entsprechende Infrastrukturunterstützung vorhanden ist. Automated guided vehicles (AGV) operieren als Containertransporter in Hafenterminals bereits nach dem ibm-Funktionsprinzip, allerdings bislang ausschließlich innerbetrieblich und nicht im Mischverkehr (z. B. Konecranes AGV [95]). Das Konzept UpBus der RWTH Aachen [71] beruht dagegen auf einem Wechsel der Transporteinheit zwischen Seilbahn und mobiler Fahreinheit im Straßenverkehr. Weitere ibm-Konzepte sind in Anhang C, Tabelle C.2 dargestellt. Das generische Fahrzeug **iMod** basiert auf dem microSNAP, skaliert auf die Größe der anderen Klassenvertreter, und repräsentiert die ibm-Fahrzeugklasse.

Die **standalone modular** Fahrzeugkonzepte (sam) bestehen wie die ibm Fahrzeuge aus einer Fahreinheit und verschiedenen einsatzoptimierten Transporteinheiten. Deren Wechsel benötigt keine externe Unterstützung und erfolgt in der Regel entweder durch eine Fahrwerksregulierung in der Fahreinheit (z. B. DLR U-Shift [21] oder eine Hubbewegung durch die Transporteinheit (z. B. Rinspeed Snap [96]). Status quo-Fahrzeuge der sam-Klasse mit Fahrwerksregulierung sind z. B. der Heimann Hubi [97], der allerdings Personal für den Wechsel der Transporteinheit benötigt. Das Porsche S.A.V.E Konzept entstand bereits 1980 in einem Forschungsprojekt zu modularen Rettungswagen, scheiterte aber an zu hohen Kosten für die Transporteinheiten, welche das Hubsystem beinhalteten. Wechselbrücken und Sattelzüge zählen nach der eingeführten Systematik ebenfalls zu der Klasse der otm-sam Fahrzeuge, erfolgen bislang aber nicht automatisiert. Allerdings gibt es Ansätze diese zu automatisieren: z. B. automatisch höhenverstellbare Wechselbrücken von Göbel [98]. Im Fahrrad-Segment bietet Rytle ein modulares Konzept an, mit dem Transporteinheiten über ein in das Lastenrad integriertes Hubsystem aufgenommen werden [99]. In Hafenterminals werden automatisierte, mobile Portalhubwagen eingesetzt, die Container über Seilwinden anheben (z. B. Kalmar Autostrad [100]). Neuartige sam Fahrzeuge sind gegenüber dem Status quo konsequent fahrerlos und elektrisch konzipiert und folgen einem Purpose

Design statt einem Conversion Design [17, 101]. Eine Auswahl weiterer Vertreter ist in Anhang C aufgeführt: Tabelle C.2. Das Fahrzeug **U-Shift** des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) [21] repräsentiert die standalone modularen Fahrzeuge (sam).

Ergänzend werden die folgenden Definitionen festgelegt:

- Eine Flotte wird als Summe aller Fahreinheiten und aller Transporteinheiten definiert.
- Während integrale Konzepte nur aus Fahrzeugen bestehen, umfasst ein on-the-road modulares Konzept neben Fahr- auch Transporteinheiten.
- Die Begriffe „Fahrzeug“ und „Fahreinheit“ werden in dieser Arbeit synonym verwendet, wobei unter on-the-road integralen Fahrzeuge der untrennbare Verbund von Fahr- und Transporteinheit verstanden wird. Bei on-the-road modularen Fahrzeugen wird zwischen Fahr- und Transporteinheit unterschieden.

3 Umfeld des urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehrs

Für die systemische Bewertung neuer Fahrzeugkonzepte ist ein umfassendes Verständnis der Wirtschaftsverkehre erforderlich, um Referenzanwendungen mit geeigneten Einsatzszenarien ableiten zu können. In diesem Kapitel werden die Wirtschaftsverkehre am Beispiel Deutschlands analysiert und an weltweiten Entwicklungen reflektiert. Aus der Umfeldanalyse wird ein morphologischer Kasten erarbeitet, mit Hilfe dessen Referenzanwendungen für die Fahrzeugbewertung synthetisiert werden können.

3.1 Herausforderungen im urbanen Verkehr

Der Güter- und Personenverkehr steigt in den nächsten Jahren entsprechend verschiedener Prognosen deutschland- [3, 6, 102] und weltweit [3, 102, 103] weiter an. Mit zunehmender Urbanisierung [1] betrifft dies verstärkt urbane Räume, wie in der Einleitung dieser Arbeit ausgeführt ist (Kapitel 1).

Einige zentrale **Herausforderungen** in Städten durch den Güterwirtschaftsverkehr umfassen die Flächenkonkurrenz zwischen Verbraucher und Lieferverkehr [10, S. 35, 104, S. 12], erfolglose Zustellversuche [104, S. 12], zeitliche Ineffizienzen, niedrige Auslastungsgrade [10, S. 35] und den durch den Onlinehandel verstärkten Bedarf nach kleinen Sendungsgrößen sowie Just-in-time Lieferungen [10, S. 35, 102, S. 224]. Zudem werden Ver- und Entsorgung dezentral durch einzelne Akteure bestimmt, statt zentral durch die Kommunen [6]. Gemessen an der Gesamtfahrleistung in Städten entstehen nur 2,5 % der Fahrleistung durch Nfz mit >3,5 t Nutzlast und 5 % durch Nfz mit <3,5 t Nutzlast (Stand 2011) [6]. Dennoch sind Nutzfahrzeuge je nach Studie für ca. 30 % der Schadstoffemissionen in Städten verantwortlich [105, 106]. Mit künftig weiter steigendem Transportbedarf werden die Belastung des Straßenverkehrs [10, S. 35, 104, S. 12] sowie der Personalmangel in Personen- und Güterbeförderung zunehmen [9, 11, 107].

Städte begegnen diesen Herausforderungen mit unterschiedlichen **Maßnahmen**. In einer Mitgliederbefragung der Bundesvereinigung Logistik wurden mehrheitlich Kopenhagen, Singapur und Amsterdam als Städte mit einer herausragenden

Verkehrspolitik genannt. Alle vereint ein Stadtfahrverbot für den motorisierten Individualverkehr (MIV), Anreize für alternative Transportmittel, Mautsysteme, starke ÖPNV-Netze, Schnellstraßen, Sharing-Angebote und eine intelligente Verkehrsleitung [108]. Weitere regulatorische Maßnahmen umfassen Umweltzonen [6, 9, 102, S. 233], bedarfsgerechte Lieferzeitfenster [6, 102, S. 233], Zufahrtsbeschränkungen nach Schadstoff- und Gewichtsklassen sowie zeitliche [6, 9, 10, 102, S. 233, 109] und räumliche Entzerrung [10]. Zudem werden Geschwindigkeitsbeschränkungen eingeführt [108]. Ausgelöst durch die Regularien werden vermehrt Kooperationen zwischen privatwirtschaftlichen Unternehmen und teilweise öffentlichen Einrichtungen (Public Private Partnerships) [102, S. 233] vorgenommen. Außerdem werden infrastrukturelle Maßnahmen, wie z. B. Konsolidierungszentren [5, 10, 102, S. 233], ergriffen, um die Effizienz des Systems durch Bündelung zu erhöhen. Des Weiteren werden eingesetzte Transportmittel und Antriebsarten diversifiziert, Transporte von Lkw auf alternative Verkehrsmittel verlagert und automatisierte Fahrzeuge entwickelt [10, 11, 102, 155, 233, 110].

3.2 Status quo, Trends und neue Konzepte

Die vorliegende Arbeit untersucht Fahrzeugkonzepte für den privaten und gewerblichen Straßenwirtschaftsverkehr in Städten, der in den Transport von Gütern und Personen unterteilt werden kann [6]. Der Definition von [111] folgend, wird der Personenbeförderungsverkehr, der die gewerbliche Beförderung von Personen (ÖPNV, Taxi etc.) umfasst, in vorliegender Arbeit als Teil des Personenwirtschaftsverkehrs betrachtet.

In den folgenden Kapiteln werden das ÖPNV Segment (Kapitel 3.2.1) und eine Auswahl der Citylogistik (Kapitel 3.2.2) detailliert; für die übrigen Segmente der Citylogistik wie Abfallbeseitigung, Catering und Handwerker wird auf bestehende Literatur verwiesen [112]. Die Bündelung verschiedener Gütertransporte sowie deren Kombination mit Personenbeförderung sind Beiträge, um die Wirtschaftsverkehre in Städten systemisch effizient zu gestalten [102, S. 255]. Daher wird im Abschnitt 3.2.3 der kombinierte Transport von Gütern und Personen untersucht.

3.2.1 Personenbeförderung

Der **öffentlichen Personennahverkehr** (ÖPNV; bis 50 km Reiseentfernung [24]) ist ein Teil des Angebots in der Personenbeförderung, welche in Deutschland nach § 1 und § 2 PBefG (Personenbeförderungsgesetz) entgeltlich oder geschäftsmäßig Personen im Linien- oder Gelegenheitsverkehr transportiert. Entsprechend § 8 Abs. 3 PBefG hat der ÖPNV einen Beitrag zur Daseinsvorsorge zu leisten. Neben dem ÖPNV existieren für Personentransporte nicht-motorisierte Individualverkehre (Rad und Fuß) und motorisierte Individualverkehre (MIV: Pkw, Zweirad). Bei Rad, Pkw und Zweirad werden neben privaten Eigentumsverhältnissen geteilte Systeme angeboten (Sharing-Konzepte). Für den öffentlichen Verkehr (ÖV) existieren kollektiv (Bus, Bahn) oder individual (Taxi) genutzte Konzepte [102, S. 10].

Die **Hauptverkehrszeiten**, d. h. Zeiträume hoher Nachfrage, werden je nach Literaturquelle und geographischem Bezug unterschiedlich definiert [113–115], wobei stets ein Peak am Morgen und am Nachmittag existiert. Für diese Arbeit wird nach der Definition der Landeshauptstadt Stuttgart zwischen den Hauptverkehrszeiten von 6–9 und 15–19 Uhr, der Nebenverkehrszeit zwischen 9 Uhr und 15 Uhr und der Schwachverkehrszeit von 19–6 Uhr unterschieden [116].

Ein verkehrsstrategisches Ziel besteht in der Verlagerung des motorisierten Individualverkehrs (MIV) auf Konzepte des ÖPNV, da der ÖPNV bei hoher Auslastung einen effizienten Transport ermöglicht [117, 118]. Unter anderem aufgrund längerer Reisezeiten, mehr Umsteigevorgängen und geringerem Komfort gegenüber Pkw wird das bestehende Angebot des Linienverkehrs nicht ausreichend genutzt [118, S. 19, 119], sodass die durchschnittliche Auslastung von Bussen im ÖPNV ca. 18 % beträgt [118, S. 32, 120]. Der Besetzungsgrad von Pkw beträgt im Mittel 1,36 (ca. 30 % Auslastung) [118, 120–122]. Die Erhebungsreihe „Mobilität in Deutschland“ zeigt eine kontinuierliche Dominanz des MIV gegenüber des ÖV [121, 123, 124].

Bedarfsgesteuerte (**On-Demand**) Konzepte für die entgeltliche⁶ Personenbeförderung auf der Straße, die mehrere Fahrtenwünsche bündeln (Pooling), sollen die Attraktivität des ÖPNV steigern. Sie zeichnen sich durch schnelle Beförderungszeiten, hohe Nachfrageorientierung, Flexibilität und kurze Wartezeiten aus [127]. Seit 2021 sind Ridepooling-Verkehre im PBefG (§ 44 und § 50) geregelt [118]. Die heutigen Möglichkeiten zur Online-Buchung und ausreichend Rechenleistung für Routing und Disposition überwinden die technischen und organisatorischen Limitationen der ersten Rufbus-Ansätze von 1987 [117, 118]. **Demand responsive Transport (DRT)** leistet eine hohe Bedarfsorientierung durch ein flexibles Angebot verschieden-kapazitiver Transportmittel und gleichzeitig hoher zeitlicher Flexibilität [128]. Die neuen Konzepte werden teilweise als fahrerlose Systeme gedacht, um Personalmangel sowie -kosten zu begegnen [11, 107, 129].

Die neuen Angebotsformen sollen den ÖPNV ergänzen und Bedarfe aus dem MIV rekrutieren [117, 118, 126]. Eine simulative Szenarioanalyse der Verkehrsveränderungen durch geteilte automatisierte Fahrzeuge im ÖPNV in Stuttgart zeigt, dass die Einführung solcher Transportmittel die systemische Fahrleistung reduziert: Werden mindestens 50 % der Fahrten mit Rideselling Fahrzeugen (automatisiert, 6 Personen) durchgeführt, ist die Fahrleistung je nach Szenario⁷ 7–36 % und die Anzahl der benötigten Fahrzeuge 42–93 % geringer als im Status quo [114, S. 58]. Demnach haben Rideselling/ Ridepooling Konzepte das Potenzial zur Verkehrsentlastung, sofern flankierende Maßnahmen diese attraktiv gegenüber dem MIV gestalten ohne dabei den ÖPNV zu kannibalisieren.

⁶ Unentgeltliche Fahrtenbündelung wird Ridesharing genannt. Bei entgeltlichen Konzepten (Rideselling) unterscheidet man Ridepooling (mit Bündelung) und Ridehailing (ohne Bündelung) [118, 125, 126].

⁷ Die Szenarien unterschieden sich hinsichtlich der Anteile von MIV, Ridesharing und Carsharing. Für alle Szenarien gilt: Betrieb von Stadtschnellbahnen, jedoch keine Linienbusse; restriktive Maßnahmen gegenüber des MIV; Im Vergleich zum Status quo unveränderte Verkehrsnachfrage; fahrerlose Fahrzeuge mit maximal 6 Fahrgästen [114].

3.2.2 Güterbeförderung

Die **Citylogistik** umfasst die Wirtschaftsverkehre in Ballungsräumen, mit der Hauptaufgabe, die Ver- und Entsorgung zu gewährleisten sowie zu optimieren [6, 10, S. 35, 110]. In der Citylogistik sind nach Kienzler et al. (2019) die folgenden Branchen zentral: Postdienste, Kurier-, Express- und Paketdienste (KEP), Konsumgüterdistribution bzw. -kontraktlogistik sowie Stückgutlogistik [9]. Die Teilgruppe der Konsumgüter zeichnet sich durch eine hohe Nachfragemenge und -frequenz, einen stark fragmentierten Markt sowie große Auswirkungen der Logistikprozesse auf die Umwelt aus [130, S. 13]. Die Bereiche KEP-Dienste, Stückgutlogistik (stationärer Einzelhandel) und Konsumgüter-Kontraktlogistik (Lebensmitteleinzelhandelsketten) sind die maßgeblichen Teilmärkte der Innenstadtbelieferung [6, 9, 130] und werden im Folgenden detailliert beschrieben.

KEP-Dienste (Kurier, Express und Paket) umfassen typischerweise Lieferungen zwischen 1 und 31,5 kg. Schwerere Sendungen werden als Stückgut aufgegeben, leichtere per Post versendet. Pakete werden an Unternehmen (B2B) oder Endkunden (B2C, C2C) geliefert [9, 131, 132]. In der KEP-Logistik wird in der Regel das Hub-and-Spoke-Prinzip (gebrochener Verkehr) eingesetzt: Zunächst werden Sendungen im Vorlauf abgeholt, im Quell-Depot sortiert und auf Lkw-Wechselbrücken für den Hauptlauf („Nachsprung“) umgeladen. Anschließend werden die Sendungen im Ziel-Depot wieder sortiert und auf die Zustellfahrzeuge für die Auslieferung im Nachlauf disponiert [133]. In 2020 ging die Entwicklung des Sendungsvolumens im B2B-Bereich um 1,5 % im Vergleich zum Vorjahr zurück, während der B2C-Markt um knapp 20 % anstieg. Ein Grund für das starke Wachstum der B2C-Lieferungen ist die COVID-19-Pandemie und die damit verbundenen Kontakt- und Ausgangsbeschränkungen, während derer Güter des täglichen Bedarfs und Schutzausrüstung vermehrt online bestellt wurden. 59 % des Umsatzes entfielen 2020 auf das Paketsegment [131]. Somit ist das B2C-Paketsegment von vorrangiger Bedeutung. Der Online-Handel und damit das KEP-Segment werden voraussichtlich weiter wachsen [6, 9, 131]. Es wird prognostiziert, dass das jährliche Sendungsvolumen in Deutschland bis 2025 um 93 % gegenüber 2015 auf 5,7 Mrd. Sendungen ansteigt, wobei das Paketsegment stärker wächst als Kurier- und

Expressdienste [131]. Typischerweise werden mit 65 % Anteil vor allem leichte Nutzfahrzeuge für KEP-Dienste im urbanen Verkehr eingesetzt (Tabelle 3.1). In 2016 wurden 87 % der B2C Sendungen per Haustürzustellung ausgeliefert, während 10 % in Paketschops und 3 % in Paketautomaten übergeben wurden [134]. Es wird erwartet, dass die Anzahl der Haustürzustellungen in Zukunft abnehmen wird [6, 9, S. 17, 109], die COVID-19-Pandemie hat bereits zu einer Zunahme der kontaktlosen Lieferungen geführt [131].

Tabelle 3.1 vergleicht charakteristische Eigenschaften der KEP-Branche mit denen anderer Logistikbereiche.

Table 3.1: Charakterisierung ausgewählter Logistikbereiche mit Relevanz für den urbanen Güterverkehr (Daten bezogen auf 2017, sofern nicht anders angegeben)			
Parameter	KEP	Stückgutverkehr	Konsumgüterdistribution/ -kontraktlogistik
Flotte im urbanen Wirtschaftsverkehr (2019) ⁸	27 % Pkw; 65 % N1; 8 % N2; N3 nur im Hauptlauf	4 % N1; 85 % N2; 11 % N3	2 % Pkw, 1 % N1; 73 % N2; 24 % N3
Laufzeit/Sendung	Paket: 1–4 Tage	1–4 Tage	Keine Angabe
Durchschnittliche Transportstrecke	50–60 km im urbanen Raum	45–60 km	45–60 km
Stopps je Tour	Ca. 100 (urban, Paket)	1–10 (Tendenz: 10)	1–10 (Tendenz: 1)
Sendungsgröße	Bis 31,5 kg; Ø 7,46 kg	31,5 kg bis 2,5 t; Ø 2 t (spez.) ⁹ , 300 kg (allg.)	bis mehrere Tonnen; Ø 2,3 t
Auslastung der Transportkapazität	urbaner Paketmarkt: 80 % (~170 Sendungen)	35–40 % (spez.) ⁹ , 40–60 % (allg.)	40–60 %
Konzept der letzten Meile	Direkte Empfängerbelieferung; Trend: Teilung der letzten Meile	Direkte Empfängerbelieferung; erste Mikrohub-Konzepte	Direkte Empfängerbelieferung
Anteil der letzten Meile an TUL-Gesamtkosten ¹⁰	35–50 % (v. a. im B2C Segment)	30–35 %	15–20 %

Quelle: Eigene Zusammenstellung; adaptiert von [9], ergänzt um Angaben aus [132, 135, 136]

⁸ N1, N2, N3: Nutzfahrzeugklassen entsprechend der Richtlinie 2007/46/EG des europäischen Parlaments

⁹ spezieller und allgemeiner Stückgutverkehr

¹⁰ TUL: Transportieren, Umschlagen (und Kommissionieren), Lagern

Im **Stückgutverkehr** werden Trocken- und Stapelgüter mit Ladehilfsmitteln transportiert, wobei auf dem Weg von Quelle zu Senke mindestens ein Umschlag erfolgt (gebrochener Verkehr). Die Transportstruktur ähnelt der des KEP-Segments [132]. Die Bündelung mehrerer Sendungen ist typisch, da eine Stückgut-Sendung in der Regel weit unter der Nutzlast eines Transportmittels liegt [9]. Im Verteilverkehr werden vor allem Nutzfahrzeuge der Klassen N1 und N2 (bis 7,5 t zGG) eingesetzt [9]. Typische Ladehilfsmittel im Stückgutverkehr sind unter anderem die standardisierte Europalette, Halbpalette, Chep-Viertelpalette, Rollbehälter und Warenhausturm [24, S. 386]. Stückgutspediteure sind häufig ebenfalls in der Kontraktlogistik tätig [132]. Ebenso wie die KEP Branche zeichnet sich der Stückgutverkehr durch einen hohen „out-sourced“ Anteil aus [132, 137]. Künftige Trends im Stückgutsegment umfassen eine erhöhte Kooperationsbereitschaft der Akteure [109] und kleinere Sendungsgrößen, die zeitlich flexibel entsprechend individueller Transportbedürfnisse geliefert werden sollen [24, S. 303].

Bei der **Kontraktlogistik** wird die Logistikdienstleistung vertragsgeregelt von einem Auftraggeber (meist Industrie oder Handel) an einen Logistikdienstleister übergeben. Die Dienstleistung umfasst den Transport der Güter sowie weitere planende, koordinierende und kontrollierende Tätigkeiten, produkt- oder prozessorientierte Zusatzleistungen sowie in vielen Fällen die Lagerung. Am Ende des Transports finden sich Betriebsstätten des Handels oder der Gastronomie (B2B), aber auch Endkonsumenten (B2C). Die Konsumgüterkontraktlogistik umfasst Kontraktdienstleistungen für die Abwicklung von Verbrauchsgütern des täglichen Bedarfs (Bekleidung, Lebensmittel inklusive Getränke und Tiefkühlware, Weiße Ware etc.) in sehr heterogener Sendungsgröße von bis zu mehreren Tonnen. Dabei sind Multi-User-Netzwerke typisch, bei denen ein Kontraktlogistiker die Dienstleistung und Infrastruktur (z. B. Kühllhäuser) für mehrere Auftraggeber anbietet. Ein dichtes Filialnetz ist für die Konsumgüterkontraktlogistik essentiell [9, 132]. Große Handelsketten, wie Edeka oder Aldi, führen die Konsumgüterdistribution selbstständig durch, da bei Lebensmitteln hohe Anforderungen an Frische, Verfügbarkeit und gesetzlichen Normen bestehen [9, 132]. Im Non-Food Segment finden sich dagegen zahlreiche Kontraktlogistiker, die mitunter auch Retouren und

andere Zusatzleistungen für die Auftraggeber abwickeln [132]. Entsprechend Tabelle 3.1 ist der Markt wenig konzentriert und der „out-sourced“ Anteil ist im Vergleich zur KEP- und Stückgutbranche signifikant kleiner. Gemäß [137] stellt die Konsumgüterdistribution/ -kontraktlogistik 27 % des Gesamtvolumens der Kontraktlogistik dar (Stand 2016).

Je nach Branche unterscheiden sich die **Transportketten**. Grundsätzlich gibt es aber stets eine Quelle (Versender) und eine Senke (Empfänger) [11]. In den beschriebenen Branchen finden in der Regel gebrochene Verkehre statt, bei denen ein oder mehrere Warenumschnläge durchgeführt werden. In Direktverkehren bzw. ungebrochenen Transporten wechselt das Transportgut das Transportmittel nicht [15, S. 15].

Von besonderer Bedeutung im Güterlieferverkehr sind die **erste und letzte Meile**, d. h. der erste/ letzte Transportschritt [5, 9, 138, 139]. Dieser Schritt hat je nach Logistiksegment einen hohen Anteil an den TUL-Gesamtkosten [139]: Tabelle 3.1. Wie weit die erste/ letzte Meile reicht, unterscheidet sich je nach Definition [5, 9]. In dieser Arbeit reicht sie bis zum direkt anknüpfenden Umschlagspunkt. Werden neue Logistikkonzepte wie Mikrodepots eingeführt, wird die erste/ letzte Meile noch einmal unterteilt.

Ökologische und soziale Ziele der Citylogistik sind häufig konträr zu den typischen Maximen der Güterlogistik nach Effizienz und Wirtschaftlichkeit [5, S. 27]. Um alle unterschiedlichen Ziele gleichermaßen besser erfüllen zu können werden **alternative Konzepte für die Citylogistik** gedacht. In der Literatur als vielversprechend diskutierte Konzepte sind unter anderem die White-Label-Logistik, urbane Konsolidierungszentren (UCC), Mikrohubbs, Warenübergabestationen (z. B. Paketstation) und eine geräuscharme Nachtlogistik (Definition im Anhang in Tabelle D.1). Die möglichen Logistikkonzepte sind wichtig für die Erarbeitung eines morphologischen Kastens in Kapitel 3.3.

Je nach Vertriebsform ändern sich auch die Anforderungen an das anliefernde Fahrzeug: Bei Lebensmittellieferungen bestehen unter anderem besondere Anforderungen

an die Kühlkette [9, 132]. Größere Betriebsstätten werden meist mit Fahrzeugen der Klassen N2 und zum Teil N3 beliefert, wobei die Anlieferung in der Regel auf Paletten oder in Rollbehältern an einer Laderampe erfolgt. Letztere entfällt bei kleineren Geschäften, die meist ebenerdig mit Rollbehältern beliefert werden. Ausgewiesene Lieferflächen fehlen häufig, sodass eine Straßenanlieferung notwendig ist [140].

3.2.3 Kombiniertes Transport von Personen und Gütern

Aktuell werden Transporte von Gütern und Personen im Straßenverkehr überwiegend getrennt voneinander durchgeführt: unter anderem bedingt durch das Spannungsfeld zwischen der volkswirtschaftlichen Betrachtung der Daseinsvorsorge im ÖPNV und dem betriebswirtschaftlichen Fokus im Güterverkehr [141] sowie genereller Unterschiede der Merkmale und Ziele beider Bereiche [15, S. 11]. Zudem bestehen rechtliche Hürden bei den Beförderungsbedingungen [133].

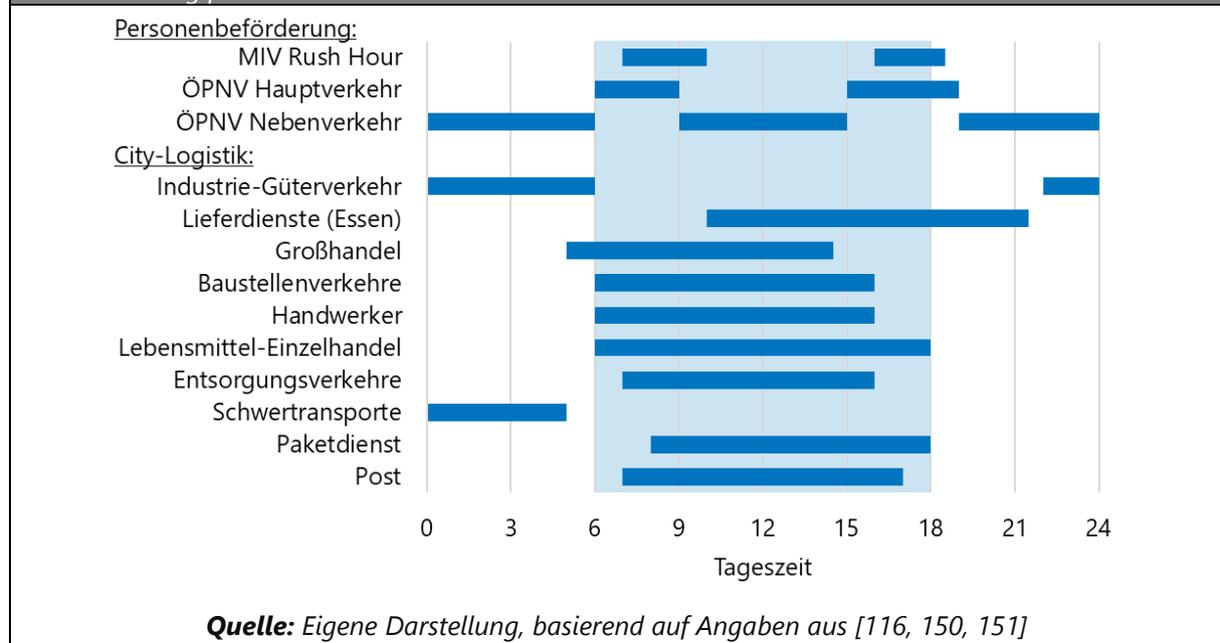
Dennoch gab und gibt es auch den kombinierten Transport von Gütern und Personen in einem Verkehrsmittel. Der Transport von Gütern in Straßenbahnen begann bereits im 19. Jahrhundert, wurde dann vermehrt auf flexiblere Straßentransportfahrzeuge verlagert und erfährt aktuell in verschiedenen Initiativen eine Wiederkehr: unter anderen in „regioKArgo“, „LastMileTram“, „kombiBAHN“, „CarGo-Tram“ [142–144]. Die Symbiose straßengebundener Personen- und Gütertransporte wurde historisch z. B. in Postbussen genutzt, verlor zunehmend an Bedeutung und wird aktuell ebenfalls in diversen Projekten wieder aufgegriffen: einige Studien untersuchen den kombinierten Transport theoretisch bzw. simulativ [12, 13, 33, 133]. Reale Fahrzeuge werden in Pilotprojekten erprobt [145–149]. Seit einigen Jahren werden außerdem automatisierte Konzepte für den kombinierten Einsatz untersucht [12, 33, 145].

Abbildung 3.1 gibt **typische Betriebszeiten urbaner Wirtschaftsverkehre** wieder. Das Verständnis für die Abfolge der Verkehre über den Tagesverlauf hinweg bildet die Grundlage dafür, verschiedene Verkehre symbiotisch zu vereinen. Zwischen 6 und 18 Uhr besteht die stärkste Überschneidung, wobei ca. 75 % der Anlieferungen bis 12 Uhr erfolgen [24]; zum Teil bedingt durch regulatorische Beschränkungen, zum Teil

durch logistische Restriktionen. Eine Kombination mit ÖPNV-Transporten scheint aktuell vor allem außerhalb der Hauptverkehrszeiten möglich.

Abbildung 3.1: Typische Einsatzzeiten verschiedener Transporte im Tagesverlauf

Für den urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehr: zwischen 6 und 18 Uhr überschneiden sich die Einsatzzeiten der Branchen am stärksten; die Rush-Hour im MIV (Motorisierter Individualverkehr) dient der Einordnung privater Straßenverkehrsteilnehmer



3.3 Entwicklung eines morphologischen Kastens

Aus den vorangegangenen Analysen für den kombinierten Transport von Personen und Gütern (Abschnitt 3.2) wird in Tabelle 3.2 ein morphologischer Kasten entwickelt, in dem relevante Merkmale in unterschiedlichen Ausprägungen mögliche Anwendungsfälle beschreiben: unter anderem verschiedene Möglichkeiten der Personenbeförderung und Zustellkonzepte in der Citylogistik. Das Vorgehen folgt der Szenariotechnik von Zwicky (1971) [152].

Tabelle 3.2: Morphologischer Kasten zur Beschreibung von Referenzanwendungen				
Merkmal	Ausprägungen			
Raumtyp	Metropole	Großstadt	Mittelstadt	...
Betreiberkonzept	Heterogen	Kooperativ	Privat	...
Logistikkonzept	White Label	Konsolidierungszentrum (UCC)		...
Personalkonzept	Autonom	Eine Person	Mehrere Personen	...
Personenbeförderung	Linie	Zubringer	DRT	...
Citylogistik				
Einzelhandelsverkehr für große Betriebe	Multi-Stopp	Single-Stopp	Konsolidiert	...
Einzelhandelsverkehr für kleine und mittlere Betriebe	Multi-Stopp	Single-Stopp	Konsolidiert	...
KEP-Dienst	Haustür-zustellung	(quasi-) stationäre Paketstation	Mobile Paketstation	...
Postdienst	Briefkasten-zustellung	Mikrohub mit Feinverteilung	Warenübergabestation	...
...				

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Für eine einheitliche und möglichst realitätsnahe Bewertung der neuartigen Fahrzeugkonzepte erfolgt diese gemäß Kapitel 1.3 anhand einer **Referenzanwendung**. Hierzu wurde der morphologische Kasten entwickelt, aus dem sich mögliche Referenzanwendungen ableiten lassen. Diese setzen sich aus der Auswahl der Einsatzzwecke, der Definition von Quellen und Zielen sowie deren Transportbedarf und Rahmenbedingungen zusammen. Darüber hinaus werden sie durch den Raumtyp sowie die Wahl eines geeigneten Betreiber-, Logistik- und Personalkonzepts definiert. Der morphologische Kasten stellt zudem eine geeignete Grundlage für die Entwicklung von Geschäftsmodellen im urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehr zur Einführung neuartiger Fahrzeuge dar.

4 Aufbau und Detaillierung eines multikriteriellen Bewertungsmodells

Nach der Erarbeitung von Klassen neuartiger Fahrzeugkonzepte und der Charakterisierung des urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehrs wird in diesem Kapitel das in Abbildung 1.2 konzipierte multikriterielle Bewertungsmodell entwickelt. Zunächst wird dazu ein Vorgehen erarbeitet mit dem Einsatzszenarien der Fahrzeuge quantifiziert werden können. Anschließend werden Methoden für eine Nutzenbewertung, Kostenanalyse, Ökobilanzierung und Technologievorhersage entwickelt. Abschließend wird ein Vorgehen zur Bewertung des disruptiven Potenzials abgeleitet, welches die vorherigen Bewertungsschritte integriert. In den Kapiteln 5 und 6 wird das Bewertungsmodell beispielhaft angewendet.

4.1 Methodik zur Quantifizierung von Einsatzszenarien

Für die quantitativen Kosten- und Umweltanalysen werden mikroskopische Nachfragedaten verschiedener Einsatzzwecke benötigt (Kapitel 1.3). Die zentrale Herausforderung bei der Bestimmung des Transportbedarfs liegt in einer defizitären Verfügbarkeit mikroskopischer Daten, wobei die Ermittlung von Nachfragemodellen ein eigenes Forschungsfeld darstellt und beliebig detailliert werden kann [10, S. 300, 109, 153]. In Kapitel 4.1.1 wird ein Vorgehen beschrieben, wie die Transportbedarfe approximiert werden können. Im nächsten Schritt wird ein Formelsatz erarbeitet, mit dem aus einem Einsatzszenario, d. h. aus der Kombination von Fahrzeug und Anwendung, verkehrliche Eingangsgrößen für die nachfolgenden Bewertungsschritte quantifiziert werden können (Abschnitt 4.1.2).

4.1.1 Ermittlung des Transportbedarfs

Bestehende Transportmodelle sind meist auf einzelne Branchen beschränkt: z. B. das Nachfragemodell TAPAS, welches die Bedarfe im Personenverkehr für eine synthetische Bevölkerung simuliert. Die Bedarfe basieren vorwiegend auf der makroskopischen Erhebungsreihe „Mobilität in Deutschland“ [154, 155]. Ein anderes Transportmodell

liefert Daten für das KEP-Segment in Berlin [153]. Die Erhebung „Kraftfahrzeuge in Deutschland“ enthält aggregierte Daten für den nationalen Güterverkehr [156].

Obwohl diese Nachfragemodelle sehr gute Daten für das jeweilige Untersuchungsgebiet liefern, fehlt ein Verfahren, mit dem die Nachfrage verschiedener Transportsegmente für beliebige Gebiete bestimmt werden kann. In dieser Arbeit wird daher ein Vorgehen zur Ermittlung der Nachfrage derart entwickelt, dass es auf nationale und internationale Quartiere sowie auf verschiedene Branchen angewendet werden kann und eine gute Näherung an die Realität ermöglicht. Im Folgenden wird die Methode exemplarisch für die Segmente Personenbeförderung, Einzelhandelsbelieferung und Paketdienste beschrieben. Letztere wurden in Kapitel 3.2.2 als zentral für die Citylogistik identifiziert [9]. Das Vorgehen wird in Kapitel 5 für eine Referenzanwendung umgesetzt.

Zur Ermittlung der Nachfrage im **Personenverkehr** wird ein möglichst granulares Verkehrsmodell eingesetzt, das in der Regel auf Haushaltsbefragungen basiert. Auf makroskopischer Ebene entspricht dies z. B. der Erhebung „Mobilität in Deutschland“ [155]. Es existieren aber auch differenziertere Modelle für einzelne Städte, wie Berlin [157], Hamburg [158] oder Stuttgart [159]. In den Verkehrsmodellen sind Fahrten zwischen Verkehrszellen aufgeführt und mit Merkmalen wie Fahrzeugtyp und Fahrtzweck verknüpft. Die Modelle bilden in der Regel den Status quo ab, wobei sich die Anteile der einzelnen Verkehrsmodi an der Gesamtnachfrage durch die Einführung neuer Mobilitätskonzepte wie dem Demand Responsive Transport (DRT, Kapitel 3.2.1) gemäß verfügbarer Simulationen [114, 128, 160–162] verändern. Der Modal Shift wird aus diesen Prognosesimulationen in die Nachfragemodelle übertragen. Mittels einer GIS-Analyse (GIS: Geoinformationssystem), d. h. einer Analyse von Geodaten, der unter der CC BY-SA 2.0 Lizenz frei nutzbaren Geodatenbank OpenStreetMap (OSM) [163] sowie der Routing-Bibliothek NetworkX [164] werden die Strecken zwischen den Verkehrszellen in Python berechnet.

Für die Ermittlung der Güternachfrage in der Einzelhandelsbelieferung der **Citylogistik** liefert OpenStreetMap ein räumlich aufgelöstes Verzeichnis von Betrieben. Aus diesem

werden mittels GIS-Analysen Points of Interest (POI), d. h. Kartenpunkte mit spezifischen Attributen, identifiziert. Über Attribute der POI [165] können diese einzelnen Kundengruppen wie z. B. Einzelhändlern oder Restaurants zugeordnet werden. Aus Statistik und Fallstudien [12, 166, 167] wird jeder POI-Kundenkategorie ein zeitabhängiger Transportbedarf zugeordnet. Die Transportdistanzen werden wie bei der Personenbeförderung in Python ermittelt.

Für das **KEP-Segment** liegen detaillierte statistische Daten vor, die im Folgenden als Grundlage zur Bestimmung der Paketnachfrage herangezogen werden können. Dazu werden Angaben des Bundesverbands für KEP-Dienste, BIEK, zur Anzahl der Pakete je Haushalt und Tag [168] mit kommunalen Daten des Untersuchungsgebiets zur Flächennutzung und Bevölkerung verknüpft. Dies ermöglicht eine granulare Verteilung der Pakete nach Stadtteilen, wobei hinsichtlich der Flächennutzung zwischen Wohn- und Gewerbegebieten unterschieden wird. Anschließend werden die Haushalte in einer GIS-Analyse gleichmäßig auf die Stadtteile verteilt, um Transportdistanzen zu ermitteln.

Auf diese Weise werden die Transportbedarfe inklusive ihrer Quellen und Senken, Distanzen, Beförderungsmengen und -häufigkeiten sowie möglichen Randbedingungen für verschiedene Einsatzzwecke ermittelt. Diese Kenngrößen werden im nächsten Abschnitt für eine Quantifizierung der Einsatzszenarien benötigt.

4.1.2 Ableitung von Einsatzszenarien und verkehrlichen Kenngrößen

Einsatzszenarien werden in dieser Arbeit als Kombination von Fahrzeugen und Anwendungsaufgaben definiert. Je nach Fahrzeugtyp müssen die Transportvorgänge unterschiedlich durchgeführt werden. Z. B. sind Logistikkonzepte aus dem morphologischen Kasten (Tabelle 3.2), die eine Haustürzustellung vorsehen, mit ausschließlich fahrerlosen Fahrzeugen nicht möglich und der Einsatz von quasi-stationären Paketstationen ist vor allem mit on-the-road modularen Fahrzeugkonzepten sinnvoll. Nach der Auswahl einer Referenzanwendung aus dem morphologischen Kasten werden die benötigten Fahrzeugtypen unter Berücksichtigung geeigneter Betreiber- und Logistikkonzepte ermittelt, z. B. eine spezielle Ausprägung für den Personentransport als DRT. Dadurch

ergeben sich unterschiedliche Einsatzszenarien für Fahrzeugkonzepte verschiedener Fahrzeugklassen in derselben Referenzanwendung.

Die Fahrten des in Kapitel 4.1.1 ermittelten Transportbedarfs müssen anschließend auf die zu untersuchenden Fahrzeuge disponiert werden. Dadurch werden die für weitere Bewertungsschritte erforderlichen Parameter aus den Einsatzszenarien ermittelt: unter anderem Flottengröße, Fahr- und Transportleistung sowie Auslastungskennzahlen.

Die Verteilung der Fahrten auf die zu untersuchenden Fahrzeuge ist ein komplexes **Optimierungsproblem** aus dem Feld des Operations Research (OR) [169]. Bekannte Probleme des OR sind das Travelling Salesman Problem und das Vehicle Routing Problem (VRP) [170–172]. Diese wurden für Status quo-Fahrzeuge bereits vielfach und unter verschiedenen Randbedingungen untersucht [173–176]. Einige Analysen nutzen dabei softwaregestützte Multi-Agenten-Systeme (MAS) zur iterativen Optimierung [32, 33, 114, 160, 177, 178]. Vor den rechenintensiven MAS erarbeiteten Daganzo und Newell im Jahr 1985 die Continuum-Approximation-Analyse (CA), die auf geometrische und mathematische Beziehungen zurückgreift, um übergreifende Transportsystembeziehungen zu ermitteln [179].

Für die in dieser Arbeit untersuchten **on-the-road modularen Fahrzeuge** für Personen- und Gütertransport existieren bisher nur wenige Ansätze [13, 32, 33]. Deineko et al. (2023) adaptierten den CA-Ansatz für eine erste Flottenanalyse modularer Fahrzeuge im ÖV-, KEP- und Einzelhandelssegment [180]. In ersten MAS-Simulationen wurde ermittelt, dass on-the-road modulare Fahrzeugflotten potenziell höher ausgelastet sind als der Status quo, wobei weniger Fahreinheiten benötigt werden [13, 33].

In der vorliegenden Arbeit wird eine angepasste Vorgehensweise entwickelt, welche die Optimierungsaufgabe für die untersuchten Fahrzeuge in einer Referenzanwendung approximiert. Bei on-the-road modularen Konzepten besteht die Flotte aus Fahr- und

Transporteinheiten, bei integralen Alternativen nur aus Fahrzeugen¹¹ (Definition in Kapitel 2.3). Das Vorgehen wird im Folgenden analog zum vorherigen Kapitel exemplarisch für die Segmente Personenbeförderung, Einzelhandelsbelieferung und Paketdienste entwickelt.

Für die **Disposition der Fahrzeuge bzw. Fahreinheiten (FE) auf die Bedarfe in der Personenbeförderung** wird zunächst Formel (4.1) in dieser Arbeit erarbeitet, um die minimal benötigte Anzahl der FE zu berechnen. Die Berechnung erfolgt für die Ausprägung als Demand Responsive Transport (DRT), ist jedoch auf andere Betriebsformen übertragbar. Die effektive Fahrgeschwindigkeit v_e ergibt sich dabei aus der Ausgangsgeschwindigkeit reduziert um den Halteanteil der Fahrgastwechsel für alle in einer Stunde transportierten Personen und um den Transferanteil für Zu- und Abfahrten. Die Anzahl der FE wird für die DRT-Bedarfe aller Zeiträume entsprechend einer Tagesganglinie berechnet. Der maximale, aufgerundete Wert entspricht der Anzahl der erforderlichen FE. In Schwachlastzeiten könnten untätige FE für andere Zwecke oder Regionen eingesetzt werden. Dazu werden im Folgenden zunächst die benötigten FE in den Güteranwendungen berechnet und die Bedarfe anschließend im Tagesverlauf eingeplant.

$$FE_{DRT} = \left\lceil \frac{\bar{d} B_{p,max}}{v_e \gamma L \bar{\vartheta}} \right\rceil \text{ mit } v_e = \bar{v} \left(1 - \frac{\gamma L \bar{\vartheta} \bar{v} t_H}{\bar{d}} - 2 t_T \right) \quad (4.1)$$

und FE_{DRT} : Anzahl benötigter Fahreinheiten bzw. Fahrzeuge
im DRT Betrieb; $\gamma = \frac{\text{Beförderungskilometer}}{\text{Gesamtkilometer}}$: Lastanteil;

\bar{d} : mittlere Fahrstrecke [km]; L : Ladekapazität je FE [Personen];

$B_{p,max}$: max. Personen je Stunde im Tagesverlauf [Personen/h];

v_e : effektive Fahrgeschwindigkeit [km/h];

\bar{v} : Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h];

t_H : Haltezeit je Stopp [h]; $\bar{\vartheta}$: mittlere Auslastung;

t_T : Anteil der Transferzeit an 1 Stunde für Zufahrt und Abfahrt

¹¹ Bei integralen Fahrzeugen sind Fahr- und Transporteinheit untrennbar verbunden (Kapitel 2).

Für den Gütertransport im **Citylogistik-Segment** sind je nach eingesetztem Fahrzeugkonzept zwei Betriebsvarianten entsprechend Abschnitt 3.3 möglich: der Multi-Stopp- oder der Single-Stopp-Betrieb im Sinne einer Warenübergabestation. Ersterer ist für die Anlieferung bei Tag geeignet, Zweiterer auch für eine Nachtanlieferung. Die Bedarfe werden in beiden Fällen nach Möglichkeit gebündelt und konsolidiert. Formel (4.2) wird zur Berechnung der benötigten Anzahl von Fahreinheiten $FE(t_B)$ in Abhängigkeit der Betriebsstunden durch Gleichsetzen der benötigten und verfügbaren Betriebsstunden hergeleitet. Die Tourlänge D_T wird durch die entsprechende Formel aus der Continuum-Approximation bestimmt [179, 180]. Die Stopps je Tour sind von der Kapazität der FE¹² sowie dem Bedarf je Kunde abhängig, die Stoppzeit je Tour unter anderem von Be- und Entladevorgängen und Zeiten für den Wechsel von Transporteinheiten bei on-the-road modularen Fahrzeugkonzepten.

$$FE_{EZ}(t_B) = \left\lceil \frac{K_g}{K_s \bar{C} t_B} \left(\bar{t}_s \bar{C} + \bar{t}_D + \frac{D_T}{\bar{v}} \right) \right\rceil \quad (4.2)$$

$$\text{mit: } D_T \cong \bar{C} \left(\frac{2 \bar{d}}{\bar{C}} + \frac{f}{\sqrt{\delta}} \right) \text{ und } \frac{\bar{C} K_s B_g}{K_g L} \leq 1$$

sowie FE_{EZ} : Anzahl benötigter Fahreinheiten im Einsatzzweck EZ;

K_g : Anzahl Kunden im Areal je Tag; K_s : Anzahl Kunden je Stopp;

\bar{C} : Anzahl durchschnittlicher Stopps je Tour;

t_B : Betriebsstunden je Tag [h]; \bar{t}_s : mittlere Zeit je Stopp [h];

\bar{t}_D : mittlere Zeit im Depot je Tour [h]; D_T : Tourlänge [km];

\bar{v} : Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h]; δ : Stoppdichte [km^{-2}];

\bar{d} : mittlere Strecke Depot zu Kunde [km]; $f = 0,57$ ⁽¹³⁾;

B_g : Gesamtzahl Güterbedarf (z. B. Paletten) je Tag;

L : Ladekapazität einer Flotteneinheit [Güter]

Für die Berechnung des Bedarfs an Fahreinheiten in der **Paketlieferung** (x2C-KEP) für Privatkunden wird zwischen verschiedenen Zustellformen unterschieden (Kapitel 3.2.2).

¹² Bzw. von der Kapazität der Transporteinheit (TE) bei on-the-road modularen Konzepten.

¹³ Routenfaktor aus der Continuum-Approximation-Methode nach Daganzo und Newell (1985) [179].

Für die konventionelle Haustürzustellung werden Erfahrungswerte des Status quo-Betriebs herangezogen (Kapitel 3.2.2): Fallstudien zu Hamburg, Berlin, München [109] und Basel [140] sowie statistische Durchschnittswerte [9].

Der Bedarf fahrerloser, mobiler Paketstationen $FE_{KEP,mPS}$ wird analog zu einer Multi-Stopp-Belieferung in der Citylogistik nach Formel (4.2) berechnet, da es nicht ausreichend Erfahrungswerte für diese Art der Zustellung gibt. Erste simulative Ergebnisse werden aber für eine Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse herangezogen [18, 31, 181, 182]. Die Anzahl der Stopps K_g/K_s ist gleich dem Produkt aus benötigten Paketstationen je Fläche und Lieferhäufigkeit je Zustellpunkt (korreliert mit der Gesamtzahl der Pakete B_g und der Ladekapazität L). Das Ergebnis ist abhängig von dem Zustellkonzept: ein längerer Stopp je Tag und Zielbereich oder mehrere kürzere Stopps. Entsprechende Eingangsparameter werden in Anlehnung an Simulationen aus der Literatur gewählt [18, 31].

Quasi-stationäre Paketstationen werden im Depot bestückt und an einen Zielort geliefert an dem sie bis zur erneuten Abholung verbleiben. Das Konzept ähnelt dem Single-Stopp-Betrieb in der Citylogistik, sodass Formel (4.2) auch geeignet ist, den Bedarf der Fahreinheiten $FE_{KEP,PS}$ in diesem KEP-Betriebskonzept zu berechnen.

Bei on-the-road modularen Fahrzeugkonzepten werden neben den Fahreinheiten FE_{EZ} der Einsatzzwecke EZ auch **Transporteinheiten** TE_{EZ} benötigt. Mit Formel (4.3) wird der Zusammenhang zwischen der Anzahl von Fahreinheiten und den benötigten Transporteinheiten erarbeitet. Je nach Lieferkonzept wird die Formel um den Quotienten aus Zeit für die Bestückung einer Paketstation und Tourdauer ergänzt. Liegt dieser über 1, werden weitere Transporteinheiten benötigt, da die Bestückung der Transporteinheit im Depot länger dauert als eine Tour. Bei Single-Stopp-Lieferkonzepten verbleiben Transporteinheiten am Zielort, sodass die Summe der Zustellpunkte ebenfalls in der Formel berücksichtigt wird.

$$TE_{EZ} = \begin{cases} FE_{EZ} \left(\left\lceil \frac{t_{BTE}}{t_{Tour}} \right\rceil + 1 \right) + n_{Ziel}, & \text{Modus 1} \\ FE_{EZ} \left(\left\lceil \frac{t_{BTE}}{t_{Tour}} \right\rceil + 1 \right), & \text{Modus 2} \\ 0, & \text{für integrale Fahrzeuge} \end{cases} \quad (4.3)$$

mit TE_{EZ} : Anzahl benötigter Transporteinheiten im EZ;
 FE_{EZ} : Anzahl benötigter Fahreinheiten im Einsatzzweck EZ;
 t_{BTE} : Beladedauer je TE [h]; t_{Tour} : Tourdauer [h];
 n_{Ziel} : Anzahl Kunden bzw. Standorte je TE;
 Modus 1: TE verbleiben an Zielorten, z. B. Paketstation;
 Modus 2: TE werden im Depot gewechselt, z. B. Multi-Stopp

Die ermittelten Formeln stellen Näherungen dar, wobei uniforme Verteilungen und Bedarfe unterstellt werden und Annahmen für unsichere Parameter angenommen werden müssen. Deshalb werden relevante Parameter variiert, um die Bandbreite der Ergebnisse aufzuzeigen. Zudem erfolgt eine **Monte-Carlo-Simulation** [183, 184] mit 10.000 Iterationen, wobei für jeden Durchgang Parameterwerte zufällig aus einer Dreiecksverteilung [184] um einen Erwartungswert (Ober- und Untergrenze: Grenzen der Parametervariation) generiert werden. Die Flottengröße wird als Modalwert der resultierenden Häufigkeitsverteilung festgelegt.

Die so ermittelten Flottenbedarfe der drei Einsatzsegmente werden entsprechend betrieblicher Rahmenbedingungen im Tagesverlauf eingeplant und derart optimiert, dass untätige Fahreinheiten möglichst für andere Zwecke genutzt werden. Zuletzt werden die Fahr- und Transportleistung sowie die effektive Auslastung der Flotte berechnet. Die Vorgehensweise wird in Kapitel 5.3 für die zu untersuchenden Fahrzeugkonzepte in einer exemplarischen Referenzanwendung durchgeführt.

4.2 Vorgehen zur Nutzenanalyse

Ein wesentliches Element bei der Bewertung neuartiger Fahrzeugkonzepte ist die Analyse ihrer Nutzenaspekte, womit die Vielfalt der in Kapitel 1 genannten Bewertungsdimensionen erfasst werden kann. Um eine hohe Validität des Bewertungsvorgehens zu erreichen, werden in diesem Kapitel bewertungsrelevante Nutzenkriterien empirisch

ermittelt und eine Vorgehensweise entwickelt, welche die Methode der Nutzwertanalyse um den analytischen Hierarchieprozess erweitert.

4.2.1 Kombination von Nutzwertanalyse und analytischem Hierarchieprozess

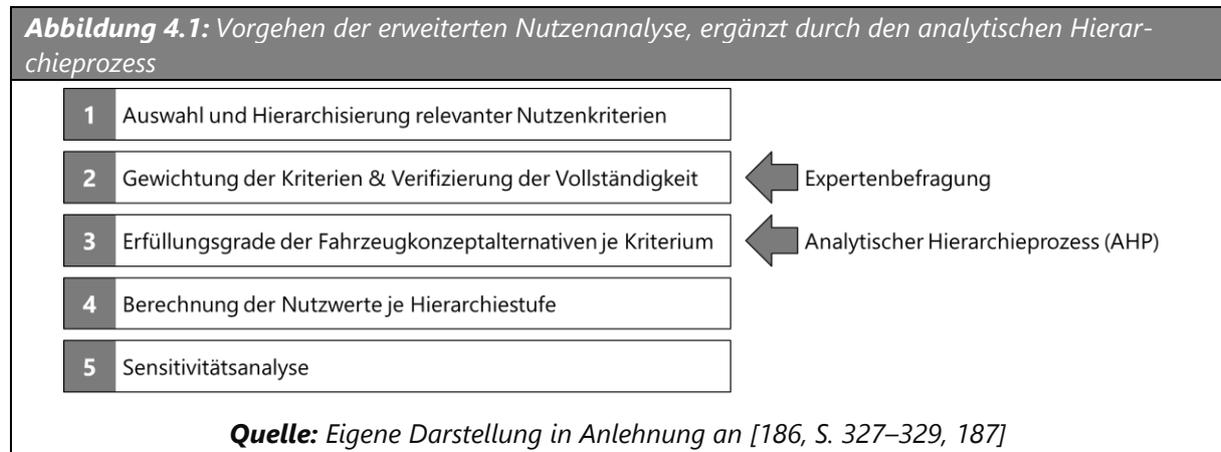
In einer Nutzwertanalyse werden Lösungsalternativen anhand von Nutzenkriterien bewertet, welche zu einem gewichteten Gesamtnutzen addiert werden. Daraus ergibt sich eine Rangfolge der Alternativen [185, 186, S. 327–329]. Die Stärken der Nutzwertanalyse sind neben der Erfassung komplexer Systeme die Transparenz und Systematik, durch die das Ergebnis rekonstruiert werden kann [187, S. 118–119, 188, S. 390–392]. Mittels Zerlegung in multikriterielle Teilnutzen können neben dem Gesamtnutzen zudem die Erfüllungsgrade der Teilnutzen bewertet werden [188, S. 392]. Kritik an der Nutzwertanalyse besteht in der subjektiven Einschätzung bei der Gewichtung der Nutzenkriterien sowie der Ermittlung der Erfüllungsgrade [186, S. 329, 187, S. 118].

Für die **erweiterte Nutzenanalyse** in dieser Arbeit wird daher das Vorgehen der Nutzwertanalyse, um den Analytischen Hierarchieprozess (AHP), eine auf Paarvergleichen basierende Methode der Entscheidungstheorie [189, 190], erweitert. Dies ermöglicht einen objektiveren und konsistenteren Vergleich der Fahrzeugkonzeptalternativen (Erfüllungsgrade). Um eine möglichst ausgewogene Gewichtung der Kriterien zu erreichen, werden Expertinnen und Experten aus verschiedenen Bereichen des urbanen Wirtschaftsverkehrs zur Vollständigkeit und Wichtigkeit der Kriterien befragt.

Eine Sensitivitätsanalyse prüft die Ergebnisse der erweiterten Nutzwertanalyse auf Robustheit. Dazu werden zum einen die Gewichtungen der Nutzenkriterien und zum anderen die Ergebnisse des AHP gedämpft und überhöht. So wird untersucht, ob die Aussagen des Bewertungsmodells auch bei unsicheren Eingangsannahmen gültig sind. Die graduelle Dämpfung von Kriteriengewichtungen und Paarvergleichen stellt eine methodische Neuentwicklung dar

Der Ablauf der erweiterten Nutzenanalyse in Abbildung 4.1 definiert. Die ersten beiden Schritte werden in Kapitel 4.2.2 und 4.2.3 bearbeitet, während die Formalisierung des

Gesamtmodells in Abschnitt 4.2.4 erfolgt. Die Schritte 3–5 werden bei der Anwendung des theoretischen Vorgehens in Kapitel 5.2 durchgeführt.



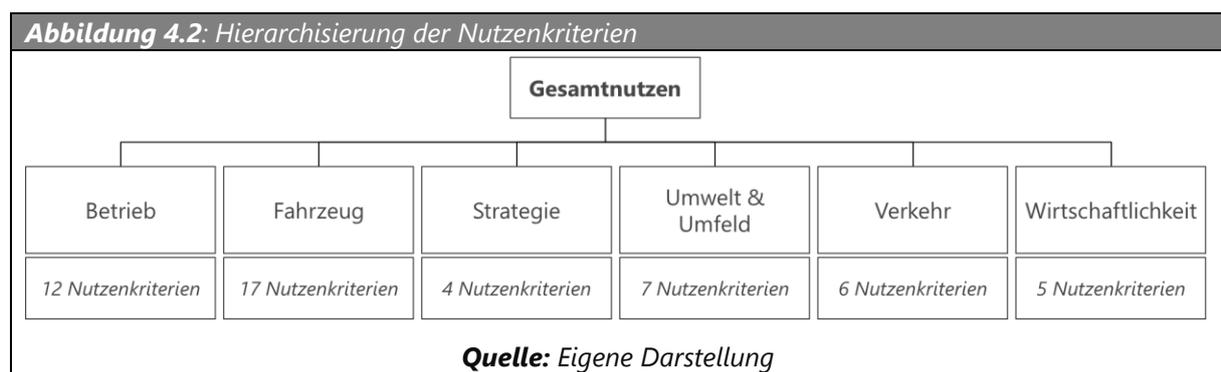
4.2.2 Erstellung eines Kriterienkatalogs

Zunächst muss eine Liste der Nutzenkriterien erstellt werden, die für die Bewertung neuartiger, modularer Fahrzeugkonzepte im urbanen Wirtschaftsverkehr relevant sind. Einige Arbeiten in der Literatur befassen sich mit Kriterien zur Bewertung konventioneller oder in der Produktion modularer Fahrzeuge: z. B. in Netzdiagrammen zu Zielkonflikten zwischen Fahrleistung, Komfort, Praktikabilität etc. [19, 191, 192]. Darüber hinaus werden Nutzwertanalysen im Fahrzeugkontext bereits vielfältig eingesetzt [36–38]. Für neuartige, on-the-road modulare Fahrzeugkonzepte im urbanen Wirtschaftsverkehr wurde bisher jedoch noch keine dezidierte Nutzenbewertung durchgeführt.

Aufbauend auf der Literaturanalyse werden die **Nutzenkriterien** für diese Arbeit erarbeitet. Dabei werden nicht nur ingenieur- und fahrzeugseitige Quellen, sondern auch Anforderungen der Anwenderseite berücksichtigt. Die Vielfalt der Anforderungen aus den verschiedenen Bereichen des Güter- und Personentransports im urbanen Wirtschaftsverkehr mit den jeweils spezifischen Anforderungen wird durch die umfassende Betrachtung berücksichtigt. Neben einer Literaturanalyse werden **Expertinnen und Experten** zu den Kriterien befragt: zum einen in einem Workshop mit den Verbänden

BIEK, HBW, VSL und VDV¹⁴ und zum anderen in einer Online-Befragung. Die Online-Umfrage ist Teil der Befragung zu den Gewichtungen der Kriterien und wird in Kapitel 4.2.3 und Anhang E detailliert. Die Verbände vertreten als Multiplikatoren die Bedürfnisse der Stakeholder im urbanen Güter- und Personentransport.

Aus der Literaturanalyse und dem Stakeholder-Workshop ergeben sich **51 Nutzenkriterien in sechs Nutzenkategorien** (Abbildung 4.2). Die Vollständigkeit des Kriterienkatalogs wurde in der Online-Umfrage (Kapitel 4.2.3) empirisch bestätigt. Tabelle F.1 erläutert die Kriterien anhand von Erfüllungsfragen und gibt die Quellen an, aus denen die Kriterien abgeleitet wurden. Eine Hierarchisierung der Kriterien in Kategorien erleichtert die Interpretation der Ergebnisse. Die berechneten Ergebnisse umfassen zum einen mehrere Kategoriennutzwerte, so dass ein Vergleich der Fahrzeugkonzepte je Kategorie möglich ist, und zum anderen einen aggregierten Gesamtnutzen.



4.2.3 Expertenbefragung zur Ermittlung der Gewichtungen

Im zweiten Schritte des methodischen Vorgehens in Abbildung 4.1 werden die Nutzenkriterien nach ihrer Wichtigkeit bewertet, wobei diese Gewichtungen maßgeblichen Einfluss auf das Ergebnis haben [193, S. 102, 194] und subjektiven Einschätzungen

¹⁴ „Bundesverband Paket und Expresslogistik e.V.“ (BIEK), „Handelsverband Baden-Württemberg e.V.“ (HBW), „Verband Spedition und Logistik Baden-Württemberg e.V.“ (VSL) und „Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V.“ (VDV)

unterliegt [193]. Durch die Einbeziehung mehrerer Expertinnen und Experten aus verschiedenen Bereichen wird eine weitgehend objektive Aussage erreicht.

In der Online-Umfrage bewerten die Befragten die Wichtigkeit der Kriterien auf einer **fünfstufigen Likert-Skala** von 0 bis 4 [195, S. 11–16]¹⁵. Dabei repräsentieren die Ränder des Intervalls „vollkommen unwichtig“ (0) und „sehr wichtig“ (4) [196, S. 4]. Die Skala wird um die Antwortmöglichkeit „keine Antwort“ ergänzt, um die Validität der Aussagen zu steigern [197, S. 91–92], da Befragte anderenfalls dazu tendieren „keine Meinung“ mit einer mittleren Punktzahl auszudrücken [197, S. 91–92, 198, S. 81–82]. In der Umfrage werden Erläuterungen zu den Kriterien entsprechend Tabelle F.1 ergänzt, sodass alle Befragten ein einheitliches Verständnis der Nutzenkriterien haben.

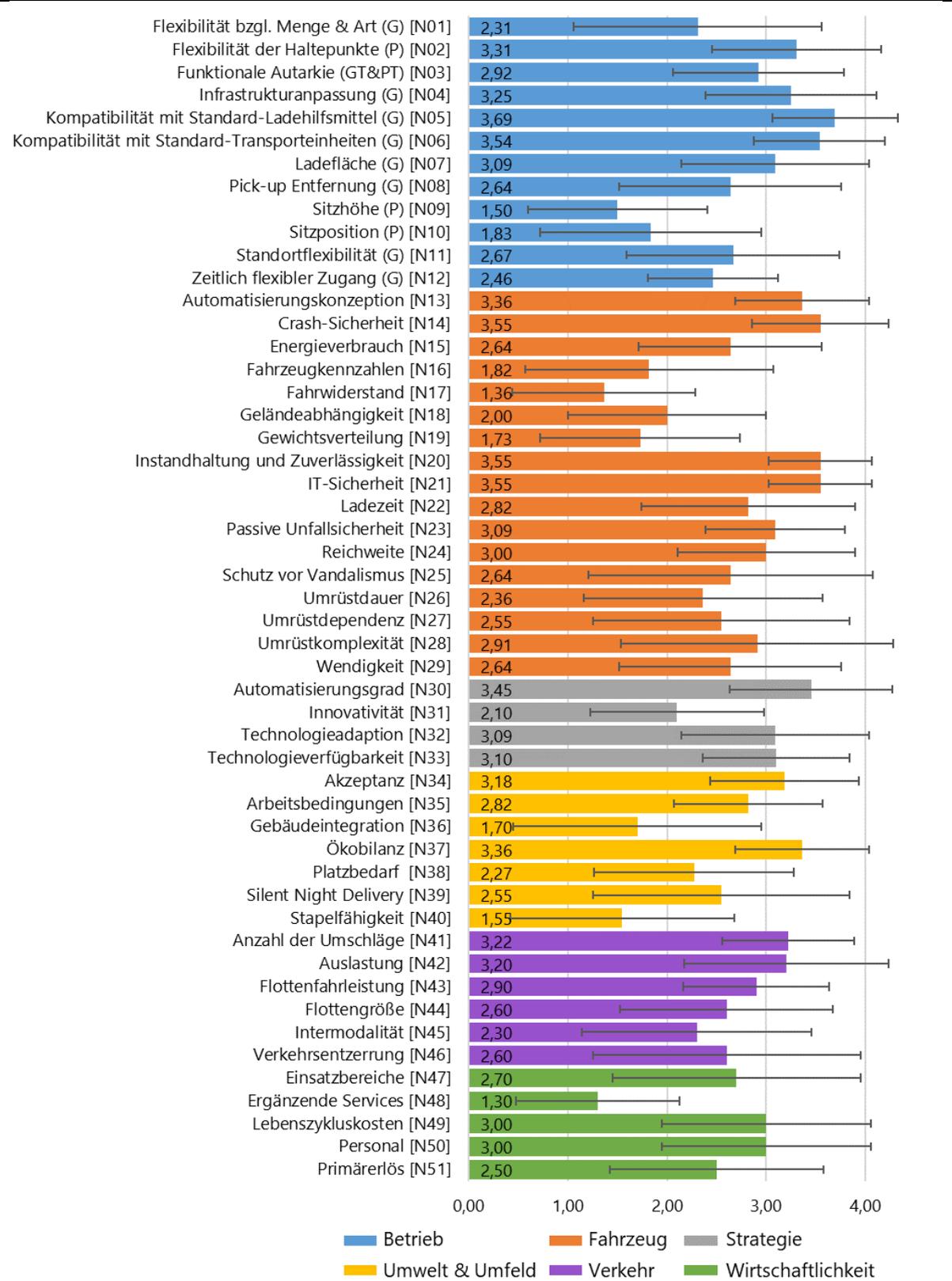
Da die untersuchten Fahrzeugkonzepte vielseitig sowohl im Güter- als auch Personen-transport eingesetzt werden können, wurde eine **heterogene Expertengruppe** befragt. Insgesamt nahmen 16 Expertinnen und Experten an der anonymen Umfrage teil. Durchschnittlich sind die Befragten ca. 18 Jahre in ihrer Branche berufstätig, haben einen akademischen Abschluss und sind paritätisch dem Personen- und Gütertransport zugehörig: Tabelle E.1 im Anhang.

Tabelle E.5 führt die Antworten der Befragten zu den **Kriteriengewichtungen** aus der Online-Befragung auf. 13 Befragte führten diesen Teil der Befragung durch, 10 beendeten ihn vollständig. In Abbildung 4.3 sind die Mittelwerte der Gewichtungen und die Standardabweichungen als Maße für die Streuung um die Mittelwerte dargestellt.

¹⁵ Weitere Verfahren zur Gewichtung der Kriterien werden in der Literatur ausführlich behandelt [193, 194].

Abbildung 4.3: Gewichtung der Nutzenkriterien

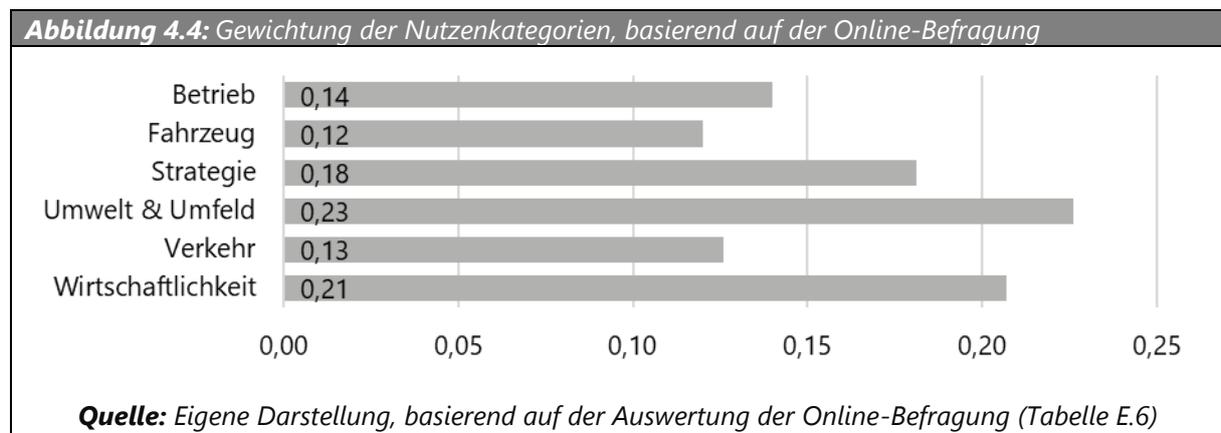
Werte basieren auf den Mittelwerten aus der Online-Befragung und sind farblich den 6 Nutzenkategorien zugeordnet; die Standardabweichung wird als Fehlerbalken dargestellt; Abkürzungen: Personen- (P) und Gütertransport (G)



Quelle: Eigene Darstellung, basierend auf der Auswertung der Online-Befragung (Tabelle E.5)

Aufgrund der Mittelwertbildung erreicht keines der Kriterien die Grenzen der Likert-Skala. Die Kriterien werden insgesamt als eher wichtig bewertet: 84 % der Kriterien werden mit 2 (mittlere Wichtigkeit) oder höher eingestuft. Davon liegen wiederum 39 % im Intervall [3, 4) („sehr wichtig“).

Die **Gewichtung der 6 Nutzenkategorien** durch die Befragten erfolgt paarweise, entsprechend des analytischen Hierarchieprozesses (AHP, Kapitel 4.2.4) in 15 Paarvergleichen. Die Methode wird eingesetzt, da relative Einzelvergleiche zuverlässiger sind als die absolute Einstufung der Wichtigkeit und die Konsistenz der Antworten überprüft werden kann [193, 194, 199, S. 22–49]. Aus den Paarvergleichen werden für alle Befragten mit der Eigenvektorthorie Gewichtungen der Kategorien berechnet und deren Mittelwerte berechnet. Die Gewichtungen befinden sich auf dem Intervall [0,1], wobei die Summe der Gewichtungen 1 ergibt. Die Ergebnisse sind in Tabelle E.6 aufgeführt, bzw. in Abbildung 4.4 zusammengefasst.



Die Kategorien Umwelt & Umfeld, gefolgt von Wirtschaftlichkeit, sind demnach für die Expertinnen und Experten am wichtigsten. Im Unterschied zu den Expertenaussagen auf Kategorie-Ebene, haben die Nutzenkriterien im Bereich Strategie die höchste durchschnittliche Relevanz (Abbildung 4.3). In absteigender Reihenfolge folgen Verkehr, Betrieb, Fahrzeug, Wirtschaftlichkeit und Umwelt & Umfeld. Mehrere Gründe können zu dieser Diskrepanz beitragen:

- Bei paarweisen Vergleichen der Kategorien könnten sich Befragte aus gesellschaftlichen Framing dazu verpflichtet fühlen ökonomische und ökologische Kategorien zu favorisieren. Wenn sie nach spezifischen Einzelkriterien gefragt werden, ergibt sich ein differenzierteres Bild.
- Während die Nutzenkriterien definiert sind und daher einheitlich ähnlich bewertet werden, sind die generischen Kategorien stärker von den Interessen der verschiedenen Stakeholder beeinflusst, welche die Befragten vertreten.
- Aus der Analyse der Einzelantworten der Befragten wird ersichtlich, dass sie individuelle Präferenzen bezüglich der Kategoriegewichtungen entsprechend ihrer Arbeitstätigkeit haben: z. B. priorisiert die Befragte bzw. der Befragter D aus der Geschäftsfeldentwicklung die Kategorie Strategie.
- Die Kriteriengewichtungen wurden je Kategorie bewertet und sind damit nur innerhalb einer Kategorie relativ zueinander vergleichbar. Daher lässt sich aus der Analyse der durchschnittlichen Relevanz der Kriterien in einer Kategorie keine Rangfolge zwischen den Kategorien ableiten.

Die Paarvergleiche der Kategorien sind daher verlässlicher, die Priorisierung der Nutzenkategorien zu bestimmen, wobei eine größere Stichprobe die Stabilität der Ergebnisse weiter verbessern würde. Bei der Anwendung des erweiterten Nutzenmodells werden sowohl die Nutzenkategorien individuell analysiert als auch der gewichtete Gesamtnutzen dargestellt. Bei der Interpretation des gewichteten Gesamtnutzens müssen obige Aussagen zu den Kategoriegewichtungen berücksichtigt werden.

4.2.4 Formalisierung des Nutzenmodells

Das folgende Kapitel stellt die mathematische Grundlage des Nutzenmodells dar und erläutert das Vorgehen des analytischen Hierarchieprozesses (AHP) sowie der Sensitivitätsanalyse als Teile des erweiterten Nutzenmodells.

Der Einzelnutzwert NW_{ω} eines Nutzenkriteriums ω ist entsprechend der Methodik der Nutzwertanalyse das Produkt aus dem Erfüllungsgrad e_{ω} und der Kriteriengewichtung g_{ω} : Formel (4.4) [187, S. 118–129, 188, S. 390–392]. Der Erfüllungsgrad gibt an wie gut

die Fahrzeugkonzeptalternativen das jeweilige Nutzenkriterium erfüllen. Der Kategorienutzwert NW_k ist die Summe der Einzelnutzwerte je Kategorie, dividiert durch die Anzahl der Kriterien in der Kategorie n_k : Formel (4.5). Der Gesamtnutzen NW_G ergibt sich entsprechend Formel (4.6) aus dem Summenprodukt der Kategorienutzwerte und der Gewichtungen der Nutzenkategorien g_k .

$$NW_\omega = e_\omega g_\omega \text{ mit } \omega \in \{N01, \dots, N51\} \quad (4.4)$$

$$NW_k = \frac{1}{n_k} \sum_{\omega}^{I_k} NW_\omega \text{ mit } \omega \in I_k, I_k \subseteq \{N01, \dots, N51\} \quad (4.5)$$

$$NW_G = \sum_k^K NW_k g_k \quad (4.6)$$

mit $k \in \left\{ \begin{array}{l} \text{Betrieb, Fahrzeug, Strategie, Umwelt} \\ \text{und Umfeld, Verkehr, Wirtschaftlichkeit} \end{array} \right\}$;
NW: Nutzwert des Kriteriums ω , der Kategorie k ;
NW_G: Gesamtnutzen; *e*: Erfüllungsgrad; *g*: Gewichtung;
n_k: Anzahl der Kriterien in einer Kategorie

Kapitel 4.2.3 gibt die Gewichtungen der Kriterien und Kategorien aus der Expertenbefragung an. Die Erfüllungsgrade werden anhand des AHP durch Paarvergleiche ermittelt, welcher im Folgenden erläutert wird.

Der **analytische Hierarchieprozess (AHP)** wurde von Thomas L. Saaty in den 1970er Jahren entwickelt, um multikriterielle Entscheidungsprobleme zu lösen [199, S. 22–49, 200]. Der AHP beruht auf Paarvergleichen und erlaubt damit eine relative Einordnung, wie viel besser oder schlechter Fahrzeugkonzeptalternative A ein Nutzenkriterium erfüllt als Alternative B. Daraus resultieren die Erfüllungsgrade e_ω der Fahrzeugkonzepte [199, S. 22–49]. Im Vergleich zu einer absoluten Bewertung reduziert der paarweise Vergleich die Komplexität der Entscheidungssituation für Entscheidungsträger, da nur zwei Alternativen im direkten Vergleich bewertet werden. Dies erhöht die Konsistenz und Validität der Ergebnisse [193, 194, 199, S. 22–49].

Die **Präferenzrelation der Fahrzeugkonzepte** wird für jedes Nutzenkriterium mittels Paarvergleichen ermittelt und in Präferenzmatrizen verknüpft [201]. Mit der Eigenvektorthorie werden die Erfüllungsgrade der Alternativen berechnet und anschließend deren Konsistenz ermittelt [190, 202].

Für die Paarvergleiche wird eine Likert-Skala von 1 bis 9 verwendet [202] und entsprechend Tabelle 4.1 operationalisiert. Ist ein Kriterium weniger wichtig als ein anderes werden die Kehrwerte der Skalenwerte genutzt. Dies beruht auf der dem AHP inhärenten Reziprozität [190, 199, S. 30–47, 202].

Tabelle 4.1: Operationalisierung der AHP-Paarvergleich	
Skalenwert	Fahrzeugkonzept A erfüllt Kriterium ω ... Alternative B.
1	...gleich gut wie...
3	...etwas besser als...
5	...spürbar besser als...
7	...viel besser als...
9	...extrem viel besser als...

Quelle: Eigene Festlegung in Anlehnung an [199, S. 37, 202–204]

Die Paarvergleiche ergeben eine quadratische Präferenzmatrix $A = (a_{ij})$ mit der relativen Präferenz a_{ij} des Fahrzeugkonzepts FK_i gegenüber der Alternative FK_j . Die **Anzahl der Paarvergleiche je Kriterium** berechnet sich nach Formel (4.7): bei 6 Konzeptalternativen 15 Vergleiche je Nutzenkriterium; insgesamt 765 Paarvergleiche [202, 205].

$$\frac{n_{FK}^2 - n_{FK}}{2} \tag{4.7}$$

mit n_{FK} : Anzahl der zu vergleichenden Fahrzeugkonzepte

Die Erfüllungsgrade der Fahrzeugkonzepte entsprechen den **Eigenvektoren** der Präferenzmatrix nach iterativem Quadrieren¹⁶ der Matrix [199, S. 30–47, 202]. Ist eine Alternative für ein Kriterium vorteilhafter als alle übrigen Alternativen berechnet sich ein hoher Erfüllungsgrad, wobei der Abstand zu den anderen Alternativen in einer absoluten Bewertung gegebenenfalls geringer wäre. Die Ergebnisse des AHP sind daher relativ in der Bewertung der Alternativen präzise, können aber nicht als absolute Werte interpretiert werden. Ein wichtiges Kriterium für die Validität der Paarvergleiche ist die Konsistenz der Entscheidungen. Der **Konsistenzfaktor** $CR = CI/RI$ berechnet sich aus der Division des Konsistenzindex CI durch einen Zufallsindex RI , welcher als von n_{FK} -abhängige Konstante definiert ist [202]. Ist der Konsistenzfaktor „nicht viel kleiner“ [189] als 0,1, ist der Paarvergleich konsistent [199, S. 30–47, 202, 205].

Zur Durchführung des AHP in dieser Arbeit wurde ein Python-Skript erstellt. Für die Berechnung der Eigenvektoren wird die open source Python-Bibliothek Numpy [206] eingesetzt, für die Datenverarbeitung die open source Python-Bibliothek Pandas [207] (jeweils Open Source nach 3-Klausel-BSD-Lizenz).

Mit den Erfüllungsgraden der Fahrzeugkonzepte aus dem AHP sowie den Gewichtungen der Nutzenkriterien aus der Expertenbefragung werden die Nutzwerte berechnet. Um den Einfluss unsicherer Eingangsdaten zu überprüfen, wird die Robustheit des Modells in einer **Sensitivitätsanalyse** untersucht. Dabei werden die Eingangsdaten, die Gewichtungen der Nutzenkriterien und die Erfüllungsgrade aus den Paarvergleichen (AHP), entsprechend Tabelle 4.2 variiert. Aus den Antworten der Befragten zu den

¹⁶ Die Präferenz ergibt sich erst dann zuverlässig, wenn der Eigenvektor der quadrierten Matrix und der zu quadrierenden Matrix nahezu identisch sind: nach Westphal (2016) um mindestens vier Nachkommastellen [199, S. 30–47].

Gewichtungen der Nutzenkriterien wird eine Standardabweichung als Dämpfungsfaktor abgeleitet: $\pm 40\%$ (mittlere prozentuale Standardabweichung; Tabelle E.5).

Tabelle 4.2: Szenarien der Sensitivitätsuntersuchungen für die Nutzenbewertung	
Szenario	Änderung
NW_S1	Variation der Kriteriengewichtungen um $\pm 40\%$
NW_S2	Variation der Paarvergleiche um $\pm 40\%$
NW_S3	Gleichsinnige Variation der Kriteriengewichtungen und Paarvergleiche um $\pm 40\%$
NW_S4	Gegensinnige Variation der Kriteriengewichtungen und Paarvergleiche um $\pm 40\%$

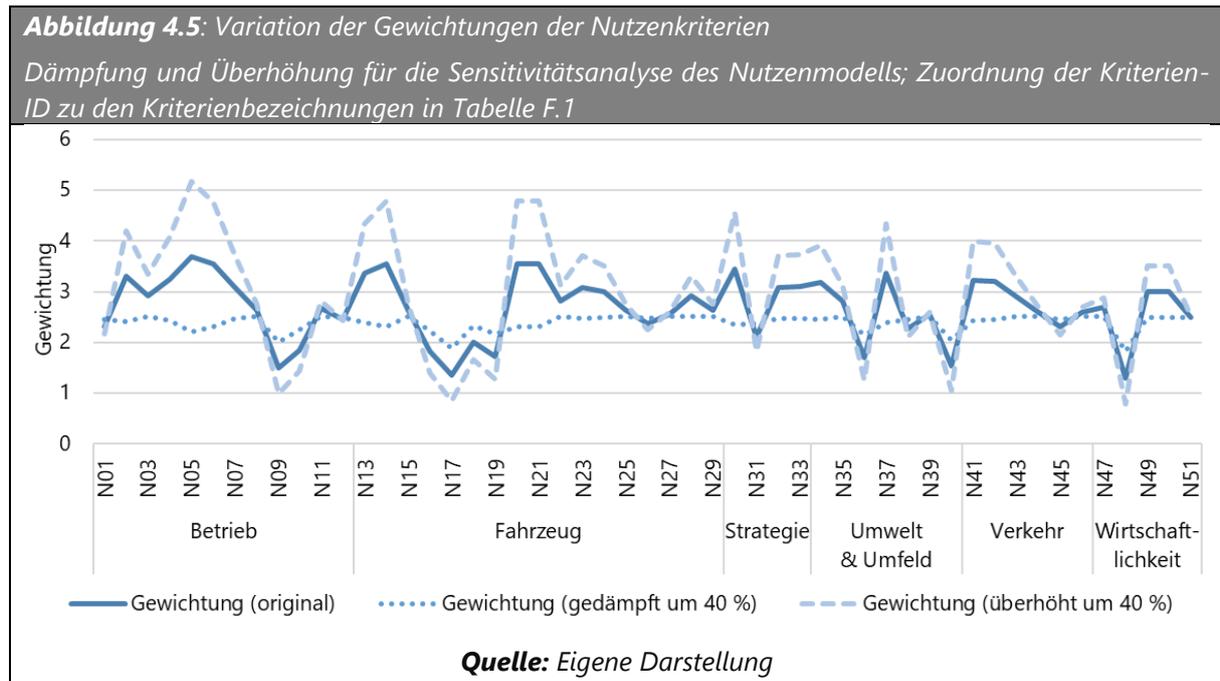
Quelle: Eigene Zusammenstellung

In Szenario NW_S1 werden die Gewichtungen der wichtigsten Nutzenkriterien um $+40\%$ reduziert (**Dämpfung**) und gleichzeitig die der unwichtigsten Kriterien um $+40\%$ erhöht. Für die dazwischen liegenden Kriterien erfolgt eine lineare Abstufung nach Formel (4.8). Zusätzlich wird der inverse Fall, eine Überhöhung, betrachtet. Abbildung 4.5 stellt die Variation der Gewichtungen für die einzelnen Nutzenkriterien bei einer Überhöhung und Dämpfung der Kriterien dar.

$$\psi_{\omega}^* = \psi_{\omega} (1 + \psi_{\omega} dfak_a + dfak_b) \tag{4.8}$$

$$\text{mit } dfak_a = \frac{-2 dfak}{\max(\Psi) - \min(\Psi)}, dfak_b = dfak - dfak_a \min(\Psi)$$

und $dfak \in [0,1]$; $\Psi = \{\psi_1, \dots, \psi_n\}$; $\psi_{\omega} \in \Psi$;
 ψ_{ω} : original Merkmal des Kriteriums ω ; $dfak$: Dämpfungsfaktor;
 ψ_{ω}^* : gedämpftes Merkmal



In Kapitel 5.2 wird das erweiterte Nutzenmodell auf die zu untersuchenden Fahrzeugkonzepte angewendet.

4.3 Kostenanalyse mittels Relevant Cost of Ownership

Die ökonomische Betrachtung ist ein wesentliches Entscheidungskriterium beim Vergleich von Fahrzeugalternativen [24, 208] und ein Zielkriterium bei der Einführung nachhaltiger Transportsysteme [50], wie in Kapitel 1 beschrieben wurde. Der folgende Abschnitt stellt unterschiedliche Arten der Kostenbetrachtung dar, wovon für das Bewertungsmodell dieser Arbeit die Methode der „Relevant Cost of Ownership“ (RCO) von konventionell integralen auf neuartig modulare Fahrzeugkonzepte erweitert wird. Alle monetären Angaben dieser Arbeit werden einheitlich für das Jahr 2020 in EUR₂₀₂₀ angegeben, unter Berücksichtigung historischer Wechselkurse und Inflationsraten in Anhang H.

4.3.1 Bekannte Methoden zur Kostenanalyse im Fahrzeugumfeld

Unter der Annahme, dass verschiedene Investitionsobjekte dasselbe Ertragspotenzial bieten, reicht ein Vergleich der Kosten aus, um das vorteilhafteste Investitionsobjekt zu ermitteln. Hierzu werden verschiedene Arten der Kostenanalyse betrachtet.

Lebenszykluskosten (engl. Life Cycle Costing, LCC) umfassen die Summe aller Kosten für die Entstehung, Nutzung und Entsorgung eines Produkts [209, 210]. Die Gesamtkosten während der Haltedauer eines Produkts werden als **Total Cost of Ownership** (TCO) bezeichnet und bestehen aus den Anschaffungskosten abzüglich des Liquidationserlöses sowie der Nutzungskosten während der Haltedauer [211, 212]. LCC und TCO sind verwandte Bewertungsgrundlagen im strategischen Kostenmanagement und werden für Investitionsentscheidungen herangezogen [212].

TCO-Analysen werden häufig in Industrie und Wissenschaft eingesetzt [212], unter anderem zur prospektiven Kostenanalyse künftiger Automobiltechnologien: z. B. zur vergleichenden Bewertung verschiedener Antriebstechnologien bei Pkw [211, 213–215] und Nutzfahrzeugen [37, 213, 214, 216]. Bei diesen Arbeiten wird in der Regel ein Fahrzeugtyp durch einen anderen ersetzt, wobei die Randbedingungen unverändert bleiben. Werden nur Teile eines Fahrzeugs ersetzt, z. B. der Antriebsstrang, spricht man von der Methode der Relevant Cost of Ownership (RCO), einer Abwandlung der TCO-Methode. Bei der RCO-Berechnung bleiben einige der Kostenbestandteile (z. B. Glider) unverändert [211, 217]. Van Duin et al. (2020) untersuchen unter Berücksichtigung logistischer Effizienzpotenziale die Kosten verschiedener Arten der Paketzustellung [38], Bösch (2018) sowie Friedrich und Hartl (2016) analysieren die Auswirkung auf die Gesamtkosten bei der Einführung autonomer Fahrzeuge im Personentransport [39, 114], während Flämig et al. (2020) sowie eine PwC-Studie deren Auswirkung im Logistiksegment untersuchen [11, 218]. Durch die Einsparung der Personalkosten werden signifikante Kostenvorteile für fahrerlose Fahrzeuge ermittelt [39, 218]. Im Bereich on-the-road modularer Fahrzeuge existieren erste Ansätze auf volkswirtschaftlicher Ebene [35] und Kostenannahmen für eine simulative Optimierung der Disposition modularer Konzepte [13, 33].

Ein Modell zur detaillierten Kostenanalyse neuartiger, on-the-road modularer Fahrzeugkonzepte existiert bisher noch nicht.

4.3.2 Modifizierung der RCO-Methode

Für den quantitativen ökonomischen Vergleich von integralen fahrerbasierten Fahrzeugen mit neuartigen fahrerlosen und modularen Fahrzeugkonzepten werden im Folgenden die relevanten Kosten während der Haltedauer einer Flotte (engl. **Relevant Cost of Ownership**, RCO) betrachtet. Da alle Fahrzeugalternativen die gleiche Transportaufgabe erfüllen, werden die Erlöse der Alternativen gleichgesetzt, so dass eine Kostenbetrachtung hinreichend ist. Die RCO-Methodik nach Mock (2010) und Kleiner (2020) [37, 211] wird derart angepasst, dass sowohl die on-the-road integralen als auch die on-the-road modularen Fahrzeuge aus Kapitel 2 erfasst und bewertet werden können. Da in der systemischen Betrachtung einige Gemeinkostenbestandteile weitgehend unabhängig von den eingesetzten Fahrzeugkonzepten sind, werden diese als konstant angenommen und nicht weiter berücksichtigt (z. B. Kosten für die Lagerhaltung). Die im Folgenden entwickelte Methode zur Kostenanalyse orientiert sich daher an dem RCO- statt an dem TCO-Ansatz [211, 217].

Bei dem Einsatz neuartiger Fahrzeugkonzepte unterscheiden sich die erforderliche Flottengröße und -zusammensetzung, die Fahrleistung und Infrastruktur sowie das Betriebskonzept. Bei modularen Fahrzeugen müssen neben den Fahr- auch Transporteinheiten in der Flotte berücksichtigt werden (Abschnitt 4.1). Im Folgenden wird ein standardisiertes RCO-Modell entwickelt, mit dem die Präferenz verschiedener Fahrzeugalternativen in einer konsistenten Methodik vergleichend bewertet werden kann.

Dazu wird Formel (4.9) entwickelt, welche die **systemisch relevanten Kosten** p. a. RCO_{sys}^a aller Fahr- und gegebenenfalls Transporteinheiten, Infrastrukturkosten sowie Gemeinkosten berücksichtigt. Die heterogene Zusammensetzung einzelner Einheiten (Fahr-, Transporteinheit, Infrastruktur) resultiert in unterschiedlichen Haltedauern H , weshalb die RCO der Einheiten je Jahr (p. a.) als Quotient auf RCO und Haltedauer berechnet werden. Die systemischen Gesamtkosten beziehen sich damit auf ein Jahr in einer Referenzanwendung. Die Heterogenität der Flotten für die Systemalternativen Sys wird durch die Summe verschiedener Typen von Fahr- bzw. Transporteinheiten

berücksichtigt, wobei $q \in [DRT; CL; KEP; \dots]$ z. B. verschiedene anwendungsspezifische Typen im Einsatz für den Personentransport (DRT) oder die Güter-Citylogistik (CL) inklusive Paketlieferungen (KEP) repräsentiert. Die verschiedenen Infrastrukturelemente werden mit dem Index r gleichermaßen behandelt. n gibt die Anzahl der jeweiligen Einheiten an, wobei $n_{TE} = 0$ für integrale Fahrzeugalternativen gilt. Die jährlichen Gemeinkosten G_{Sys}^a der Systemalternative umfassen Kosten wie z. B. Management- oder Mietkosten, die nicht durch die Kostenträger Fahreinheit, Transporteinheit oder Infrastruktur abgedeckt sind. Für eine vergleichende Bewertung kann G_{Sys}^a vernachlässigt werden, sofern sich die Gemeinkosten für alle Systemalternativen nicht unterscheiden. Damit ergibt sich Formel (4.9) für die Berechnung der relevanten Kosten p. a. einer Systemalternative RCO_{Sys}^a , bezogen auf den Zeitpunkt $t = 0$.

$$RCO_{Sys}^a = \sum_q \frac{n_{FE,q} RCO_{FE,q}}{H_{FE,q}} + \sum_q \frac{n_{TE,q} RCO_{TE,q}}{H_{TE,q}} + \sum_r \frac{n_{I,r} RCO_{I,r}}{H_{I,r}} + G_{Sys}^a \quad (4.9)$$

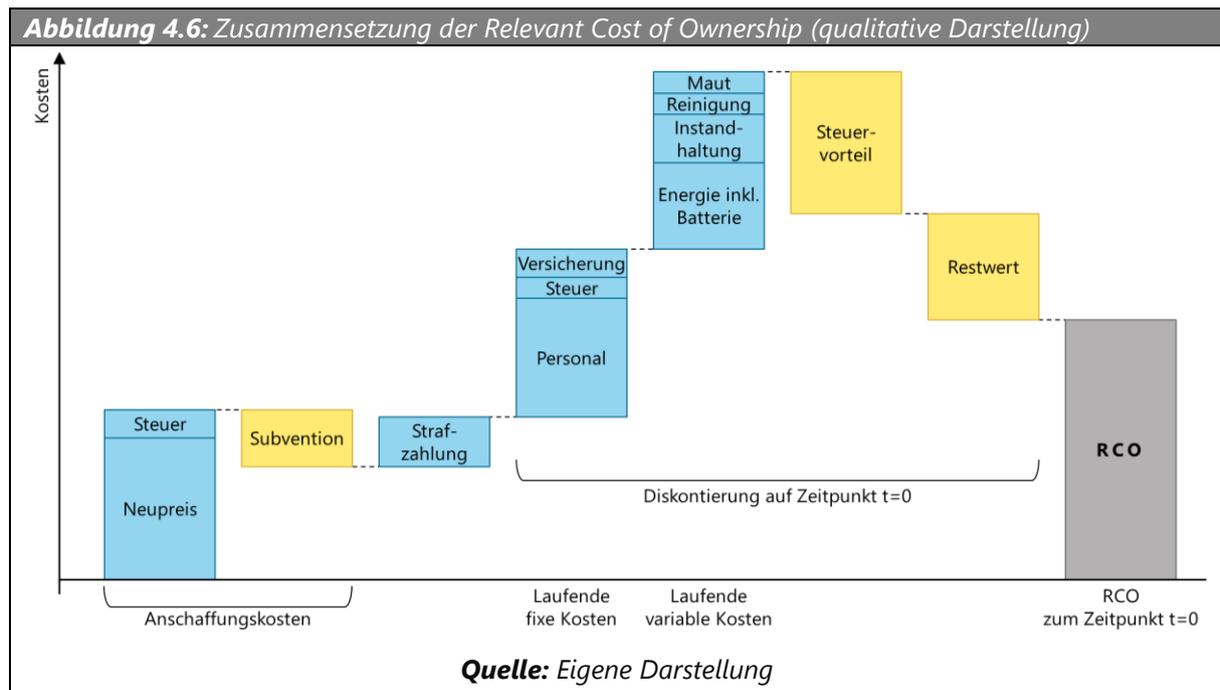
mit RCO_{Sys}^a : systemische Relevant Cost of Ownership p. a. [EUR];

n : Anzahl der Fahreinheiten bzw. Fahrzeuge (FE_q);

Transporteinheiten (TE_q) und Infrastruktureinheiten (I_r);

H : Haltedauer [Jahre]; G : Gemeinkosten [EUR]

Die RCO einer Einheit in Formel (4.9) umfassen alle Kosten für die Anschaffung, die Nutzung und den Wiederverkauf (Abbildung 4.6), wobei die nach dem initialen Zeitpunkt $t = 0$ anfallenden Kosten auf diesen Zeitpunkt diskontiert werden müssen, um den Zeitwert des Geldes zu berücksichtigen (Barwert [219, S. 115, 220]).



Die Formel für die Berechnung der Relevant Cost of Ownership (RCO) wird aus der **Kapitalwertmethode** abgeleitet. Die Kapitalwertmethode ist ein Verfahren der dynamischen Finanzmathematik und erlaubt eine Aussage darüber, ob ein Investitionsobjekt vorteilhaft ist. Der Kapitalwert wird als Barwert auf den Zeitpunkt $t = 0$ bezogen, zu welchem die initialen Anschaffungsauszahlungen anfallen. Die in der Periode $t \in [1; \dots; H]$ anfallenden Zahlungen werden mit dem Abzinsungsfaktor $(1 + i)^{-t}$ diskontiert, um den Barwert zu erhalten, wobei i den Kalkulationszinsfuß darstellt. Am Ende der Nutzungsdauer H wird der mit $(1 + i)^{-H}$ diskontierte Liquidationserlös gutgeschrieben [219, S. 115, 220].

Aus der Kapitalwertformel ergibt sich die allgemeine **RCO-Formel** (4.10) für die Einheiten E (Fahr-, Transporteinheit, Infrastruktureinheit), wobei ausschließlich Kosten berücksichtigt werden¹⁷ und konstante Zahlungen während der Haltedauer angenommen werden. Bei konstanten Zahlungen in den Perioden t kann die geometrische Reihe der

¹⁷ Der Steuervorteil StV und der Wiederverkaufserlös werden berücksichtigt, Erlöse durch den Betrieb der Einheiten allerdings nicht [37].

Kapitalwertformel für die Abzinsung entsprechend Formel (4.11) in Diskontierungsfaktoren α umgeformt werden [215].

$$RCO_E = AK_E + SZ_E + LK_E^a \alpha_{LK}(H_E) - StV_E - RW_E(H_E) \alpha_{RW}(H_E) \quad (4.10)$$

$$\alpha_{LK}(H) = \sum_{t=1}^H \frac{1}{(1+i)^t} = \frac{(1+i)^H - 1}{i(1+i)^H} \quad (4.11)$$

$$\alpha_{RW}(H) = (1+i)^{-H}$$

mit AK : Anschaffungskosten der Einheit E [EUR];
 SZ : Strafzahlungen [EUR]; StV : Steuervorteil [EUR];
 LK^a : Laufende Kosten [EUR p. a.]; H : Haltedauer [Jahre];
 RW : Restwert zum Zeitpunkt H [EUR]; i : Kalkulationszins;
 α_{LK} und α_{RW} : Diskontierungsfaktoren

4.3.3 Ermittlung der relevanten Kostenbestandteile

In den folgenden Abschnitten werden die Kostenbestandteile des Modells detailliert und parametrisiert. Die Anwendung des Modells auf die untersuchten Fahrzeugkonzepte erfolgt in Kapitel 5.5.

Anschaffungskosten

Die **Anschaffungskosten** AK setzen sich nach Gleichung (4.12) aus dem Neupreis vor Steuern NP sowie Steuern und Subventionen zusammen.

$$AK_E = NP_E (1 + USt_E + ZuSt_E) - Sub_E \quad (4.12)$$

mit AK_E : Anschaffungskosten der Einheit E [EUR];
 NP : Neupreis [EUR]; $U/ZuSt$: Umsatz-/Zulassungssteuersatz;
 Sub : Subvention [EUR]

Unternehmen sind nach § 15 des Umsatzsteuergesetzes vorsteuerabzugsbefähigt [221], weshalb in der RCO-Betrachtung für den deutschen Finanzraum die Umsatzsteuer USt vernachlässigt werden kann. Dasselbe gilt für die Zulassungssteuer $ZuSt$, die von einigen Ländern wie z. B. Spanien, Irland oder Kroatien erhoben wird; in Deutschland aber nicht zur Geltung kommt [222, 223]. Subventionen Sub stellen

Kaufanreize dar, um die Einführung bestimmter Produkte zu begünstigen; wie z. B. in Deutschland die Kaufprämien für Elektrofahrzeuge [224].

Der **Neupreis** NP_E einer Flotteneinheiten wird durch die Multiplikation der Herstellkosten HK mit dem Retail Price Equivalent (RPE) berechnet, mit welchem den direkten Produktionskosten indirekte Kosten für Marketing, Forschung und Entwicklung, Logistik, unternehmerischer Profit etc. zugerechnet werden [225]. Für Nutzfahrzeuge nimmt eine Studie des Umweltbundesamts einen RPE von 1,5 an [226, S. 165], während Kleiner (2020) 1,45 [37, S. 100] und eine Studie der US-amerikanischen Umweltschutz-Behörde EPA 1,36 annehmen [227]. In der vorliegenden Arbeit wird für Fahr- und Transporteinheiten der RPE mit 1,45 als Median der Studien festgelegt.

Steuervorteil

Unternehmen können nach § 7 des Einkommenssteuergesetzes (EStG) abnutzbare Anlagevermögen sowie laufende Kosten als Betriebsausgaben von der Steuer absetzen, sofern der zu versteuernde Gewinn ausreichend hoch ist, und damit einen **Steuervorteil** StV erzielen [228]. In Deutschland dürfen Strafzahlungen nach EStG § 12 nicht steuerlich abgesetzt werden. Subventionen gelten im Sinne des § 255 des Handelsgesetzbuchs (HGB) als Anschaffungspreisminderung [229] und werden damit von der Bemessungsgrundlage der Abschreibung abgezogen.

Der Steuervorteil wird nach Gleichung (4.13) berechnet.

$$StV_E = i_U \left[\left(AK_E - \frac{AK_E}{afa} \omega - RW_E(H_E) \right) \alpha_{RW}(H_E) + LK_E^a \alpha_{LK}(H_E) + \frac{AK_E}{afa} \alpha_{LK}(\omega) \right] \text{ mit } \omega = \begin{cases} H_E & \text{für } H_E \leq afa \\ afa & \text{für } H_E > afa \end{cases} \quad (4.13)$$

und i_U : Unternehmenssteuersatz; α : Diskontierungsfaktor
 $AK_E - H_E AK_E/afa$: Buchhalterischer Restwert der Einheit E zum Ende der Haltedauer H_E [EUR]; H_E : Haltedauer [Jahre];
 LK_E^a : Laufende Kosten p. a. [EUR]; $RW_E(H_E)$: tatsächlicher Restwert bzw. Verkaufserlös [EUR]; afa : betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer [Jahre]

Die Betriebsausgaben werden als laufende Kosten, ebenso wie die Abschreibungen als jährlich konstante Zahlungen mit dem Diskontierungsfaktor α_{LK} abgezinst und anschließend mit dem Unternehmenssteuersatz i_U multipliziert. Der Unternehmenssteuersatz beträgt entsprechend des Bundesfinanzministeriums 30 % in Deutschland [230]. Nach der betriebsgewöhnlichen Nutzungsdauer kann das Gut nicht weiter abgeschrieben und damit auch nicht mehr steuerlich geltend gemacht werden. Daher muss für die nachfolgenden Jahre eine Fallunterscheidung erfolgen, nach der die Abschreibungen nicht mehr mit $\alpha_{LK}(H)$ abgezinst werden, sondern mit der kompletten Abschreibung des Wirtschaftsguts $\alpha_{LK}(afa)$. Zusätzlich muss der effektive Gewinn oder Verlust aus dem Wiederverkauf versteuert werden. Die betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer afa wird vom Bundesfinanzministerium vorgegeben und beträgt z. B. 6 Jahre für Nutzfahrzeuge bis 7,5 t zulässiger Gesamtmasse sowie für Wechsellaufbauten [231].

Laufende fixe Kosten

Die laufenden Kosten LK^a fallen jährlich über die Haltedauer an und werden als konstant angenommen. Sie sind die Summe aus fixen LFK^a und variablen Kosten LVK^a : Formel (4.14). Die jährlichen fixen Kosten setzen sich nach Formel (4.15) wiederum aus jährlichen Personalkosten PK , Versicherungssätzen Ver und Steuern St zusammen.

$$LK_E^a = LFK_E^a + LVK_E^a \quad (4.14)$$

$$LFK_E^a = PK_E^{a,y} + Ver_E^a + St_E^a \quad (4.15)$$

mit LK_E^a : jährliche laufende Kosten der Einheit E [EUR];
 LFK^a/LVK^a : jährliche laufende fixe/variable Kosten [EUR];
 Ver^a : Versicherungskosten p. a. [EUR]; St^a : Steuern p. a. [EUR];
 PK^a : Personalkosten p. a. [EUR]

Beim Vergleich von Fahrzeugen mit unterschiedlichen Automatisierungskonzepten (manuell, fahrerlos oder teleoperiert) unterscheiden sich die **Kosten für Fahrpersonal** PK_{FE}^a . Das benötigte Fahrpersonal ist abhängig von dem Automatisierungskonzept [39] und der erforderlichen Flottengröße im jeweiligen Einsatzszenario (Abschnitt 4.1).

In erarbeiteter Formel (4.16) wird die kumulierte jährliche Betriebszeit BZ_{FE}^a mit dem Entgelt je Stunde EG sowie den Lohnnebenkosten LNK in Höhe von durchschnittlich 23,3 % des Bruttoverdienstes [232] multipliziert. Bei teleoperierten Fahreinheiten gibt der Faktor TO_{koeff} an, wie viele Fahreinheiten gleichzeitig von einem Teleoperator überwacht werden können. Im autonomen Betrieb fallen keine Personalkosten für die Fahraufgabe an, dasselbe gilt für Transporteinheiten und Infrastruktur. Auf systemischer Ebene werden weitere Personalkosten über die Gemeinkosten berücksichtigt.

$$PK_{FE}^a = BZ_{FE}^a \begin{cases} EG_{FP}^h (1 + LNK), \text{ für manuellen Fahrbetrieb} \\ \frac{EG_{TO}^h}{TO_{koeff}} (1 + LNK), \text{ für teleoperierten Fahrbetrieb} \\ 0, \text{ für autonomes Fahren} \end{cases} \quad (4.16)$$

mit PK^a : jährliche Personalkosten [EUR];
 LNK : Lohnnebenkosten; BZ^a : Betriebszeit der Fahreinheit
 FE p. a. [h]; EG : Entgelt Fahrpersonal FP bzw.
 Teleoperator TO [EUR/h]; TO_{koeff} : Anzahl der durch 1 TO
 überwachten FE

Der jährliche **Versicherungssatz** eines Kraftfahrzeugs wird in Deutschland anhand von verschiedenen Risikomerkmale ermittelt [233, 234, S. 32]. Kleiner (2020) nimmt in Vereinfachung einen jährlichen Versicherungssatz von 1,5 % der Anschaffungskosten sowohl für konventionell als auch elektrisch betriebene Nutzfahrzeuge an [37, S. 57]. Reale Versicherungssätze für selbstfahrende Fahrzeuge liegen noch nicht vor, verschiedene Studien nehmen im Mittel jedoch eine Reduktion um 40 % an, begründet durch die mehr als doppelt so hohe potenzielle Sicherheit dieser Fahrzeuge gegenüber Fahrzeugen mit Fahrpersonal¹⁸ [39, S. 50, 235, S. 26–31, 237, S. 627, 238].

¹⁸ Fahrzeugführerinnen und -führer sind statistisch gesehen für 90 % der Unfälle verantwortlich [235, S. 26–31]. Die Anzahl der Unfälle bei fahrerlosen Fahrzeugen reduziert sich potenziell um 80 % gegenüber des Status quos [236].

Auf diesen Daten basierend werden in vorliegender Arbeit 1,5 % der Anschaffungskosten für die jährliche **Kfz-Versicherung** der Fahrzeuge mit Fahrer angesetzt und 0,9 % für den fahrerlosen Betrieb. Für Transporteinheiten wird ein jährlicher Steuersatz von 0,50 % der Anschaffungskosten angenommen.

Auf Elektrofahrzeuge, die zwischen dem 18.05.2011 und 31.12.2025 zugelassen werden, wird nach § 3d des Kraftfahrzeugsteuergesetzes (KraftStG) zehn Jahre lang, aber längstens bis 31.12.2030, keine **Kraftfahrzeugsteuer** (Kfz-Steuer) erhoben [239]. Nach 2030 werden diese je nach zulässiger Gesamtmasse mit den Steuersätzen in Tabelle 4.3 besteuert. Es wird angenommen, dass sich Transporteinheiten modularer Fahrzeugkonzepte analog zu ISO-Containern verhalten und demnach nicht extra besteuert.

Tabelle 4.3: Kfz-Steuer in Deutschland ab dem 01.01.2021		
Einheit	Fahrzeugsegment	Jährliche Steuer [EUR ₂₀₂₀]
Elektrofahrzeug/- einheit	3,5 t zulässige Gesamtmasse	104,48
	7,5 t zulässige Gesamtmasse	141,29
	12 t zulässige Gesamtmasse	264,68
ISO-Container (≙ Transporteinheit)		0,00

Quelle: [239]

Laufende variable Kosten

Die laufenden variablen Kosten p. a. VLK^a werden nach Formel (4.17) berechnet.

$$LVK_E^a = EnK_E^a + BatK_E^a + IHK_E^a + RK_E^a + Maut_E^a \quad (4.17)$$

mit LVK_E^a : laufende variable Kosten für die Einheit E p. a. [EUR];
 EnK^a : Energiekosten p. a. [EUR]; $BatK^a$: Batteriekosten p. a. [EUR];
 $Maut^a$: Mautgebühren p. a. [EUR]; RK^a : Reinigungskosten p. a. [EUR];
 IHK^a : Instandhaltungskosten p. a. [EUR]

Die **jährlichen Energiekosten** einer Einheit EnK_E^a ergeben sich aus dem Produkt des jährlichen Energieverbrauchs und dem Bruttoenergiepreis. Für den Strompreis wird eine Prognose des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (2020) zur

Entwicklung des Strompreises für Gewerbe und Handel mit 220 EUR₂₀₂₀/MWh für das Referenzjahr 2040 angenommen [240].

Bei batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) entfällt ein hoher Anteil der Gesamtfahrzeugkosten auf den **Batteriespeicher** [216, 241]. Wenn die Batteriebensdauer geringer ist als die des Fahrzeugs, fallen Kosten für Batteriewechsel an [39, 216, 242], sobald die Batterien 60–80 % ihrer ursprünglichen Kapazität unterschreiten (EoL, End of Life). In Second-Life-Anwendungen mit weniger kritischen Leistungsanforderungen können solche Batterien jedoch wiederverwertet werden [215, 243]. Die Wiederverkaufskosten für den Second-Life-Einsatz werden an dieser Stelle aber nicht berücksichtigt, da verlässliche Angaben hierzu noch nicht vorliegen [215].

Das Berechnungsmodell dieser Arbeit folgt dem Ansatz variabler von der Fahrleistung abhängiger Batteriekosten [39, 216], wobei die **jährlichen Batteriekosten** $BatK_E^a$ für eine Fahr- oder Transporteinheit E nach Formel (4.18) aus dem spezifischen Batteriepackpreis $sBatP$, der benötigten Batteriekapazität $BatKap_E$, der Lebensdauer der Batterie in km FL_{Bat}^{EoL} und der jährlichen Fahrleistung der Einheit FL_E^a berechnet werden. Die Kosten für den ersten Batteriespeicher dürfen daher nicht in den Anschaffungskosten der Einheit berücksichtigt werden. Die Lebensdauer der Traktionsbatterien wird aus einer Literaturanalyse mit durchschnittlich 200.000 km angenommen [244–250] (Kapitel 5.4). Eine Metaanalyse des Joint Research Council der Europäischen Kommission zu der prospektiven Entwicklung der Kosten von Traktionsbatterien ergibt eine Bandbreite von 50 bis 120 EUR₂₀₂₀/kWh für den spezifischen Batteriepackpreis im Jahr 2040 [251]. Im Abgleich mit anderen Studien [214, 241, 252] werden 80 EUR₂₀₂₀/kWh definiert.

$$BatK_E^a = sBatP \cdot BatKap_E \cdot \frac{FL_E^a}{FL_{Bat}^{EoL}} \text{ für } E \in \{FE; TE\} \quad (4.18)$$

mit $BatK_E^a$: jährliche Batteriekosten der Fahreinheit (FE) oder Transporteinheit (TE) [EUR]; $sBatP$: Batteriepreis auf Packebene [EUR/kWh]; $BatKap$: Batteriekapazität [kWh]; FL_E^a : jährliche Fahrleistung der Einheit [km]; FL_{Bat}^{EoL} : Lebensdauer der Batterie [km]

Die jährlichen **Instandhaltungskosten** IHK_{FE}^a von Fahreinheiten werden nach Formel (4.19) anhand der Fahrleistung berechnet [253, 254]. Für das Bezugsjahr 2040 ergeben sich die spezifischen Instandhaltungskosten $sIHK$ in Tabelle 4.4, welche auch für fahrerlose Fahreinheiten angenommen werden [39, S. 50].

$$IHK_{FE}^a = sIHK_{FE} FL_{FE}^a \tag{4.19}$$

mit: IHK_{FE}^a : Instandhaltungskosten für Fahreinheiten (FE) p. a. [EUR];
 FL_{FE}^a : jährliche Fahrleistung der FE [km];
 $sIHK_{FE}$: spezifische Instandhaltungskosten [EUR/km]

Tabelle 4.4: Zusammensetzung der spezifischen Instandhaltungskosten ($sIHK_{FE}$) im Jahr 2040 Werte für Elektrofahrzeuge nach zulässigem Gesamtgewicht (zGG); inklusive Kosten für Reifenwechsel			
Parameter	zGG: ≤3,5 t	zGG: 3,5–7 t	zGG: >7–7,5 t
$sIHK_{FE}$ [EUR ₂₀₂₀ /100 km]	3,98	3,33	5,20

Quelle: inflationsbereinigte Datensatz von [37]

Für Fahrzeuge im öffentlichen Personentransport fallen **Reinigungskosten** RK an, bei integralen Fahrzeugen für die Fahreinheit RK_{FE} , bei modularen Konzepten für Personen-Transporteinheiten RK_{TE} . Die spezifischen Reinigungskosten werden mit 3 EUR₂₀₂₀/100 km an Literaturwerten orientiert [39, S. 234, 255]. Die Reinigungskosten für fahrerlose Systeme werden verdoppelt, da das Fahrpersonal meist bereits eine grundlegende Reinigung übernimmt und zudem als Aufsichtsperson fungiert [39]. Im Güterverkehr werden die Reinigungskosten als vernachlässigbar gering angesehen.

Restwert neuartiger Fahrzeugkonzepte

Der **Restwert** einer Fahreinheit entspricht dem potenziell erzielbaren Wiederverkaufswert abzüglich Demontage- und Veräußerungskosten [217]. Kleiner (2020) hat eine Regressionsanalyse für die Wiederverkaufswerte von verbrennungsmotorisch angetriebenen Nutzfahrzeugen durchgeführt und dabei einen Zusammenhang zwischen Fahrzeugsegment bzw. zulässigem Gesamtgewicht und der Fahrleistung vor dem

Wiederverkauf identifiziert: Formel (4.20) mit den Funktionsparametern φ und β in Tabelle 4.5 [37, S. 67]. Um die Formel auch auf Elektrofahrzeuge anwenden zu können hat er Fuzzy-Variablen zu Technologiereife, Infrastrukturdichte und Antriebstechnologie durch den Skalierungsfaktor ε_{FE} ergänzt [37].

$$RW_{FE}(FL_{FE}^{H_{FE}}) = NP_{FE} \varphi_{FE} e^{\left(\frac{FL_{FE}^{H_{FE}} \beta_{FE}}{1000 \varepsilon_{FE}}\right)} \text{ und} \quad (4.20)$$

$$\varepsilon_{FE} = \frac{1}{J} \left(1 + \sum_{j=1}^J \varepsilon_{FE,j}\right) \quad (4.21)$$

mit RW_{FE} : Restwert der Fahrinheit FE am Ende der Haltedauer H [EUR]; FL : Fahrleistung [km]; NP : Neupreis [EUR]; φ, β : Funktionsparameter [-]; ε : Skalierungsfaktor (Fuzzy)[-]

Tabelle 4.5: Parameter der Restwert-Funktion (4.21) für Fahrzeuge mit unterschiedlichem zulässigem Gesamtgewicht zGG

Parameter	3,5t zGG	7,5t zGG	12t zGG
φ [-]	0,879	0,906	0,922
β [-]	-0,008	-0,005	-0,004

Quelle: [37, S. 67]

Während Kleiner (2020) ausschließlich verschiedene Antriebskonzepte betrachtet [37], sind für diese Arbeit zwei weitere Technologiebereiche relevant: die Automatisierung und die Modularisierung. Die Fuzzy-Variablen $\varepsilon_{FE,j}$ werden in dieser Arbeit daher erweitert, um die Infrastrukturdichte von Antriebs-, Automatisierungs- und Modularisierungskonzepten ($j = \{1; 2; 3\}$), die Technologiereife von Antriebs- und Automatisierungskonzepten ($j = \{4; 5\}$) sowie die Einsatzvariabilität von Modularisierungskonzepten ($j = 6$) zu berücksichtigen (Tabelle I.1). Die Fuzzifizierung dieser Variablen wird in Anhang I erläutert. Da die Regressionsanalyse für integrale, verbrennungsmotorisch betriebene Nutzfahrzeuge mit Fahrpersonal durchgeführt wurde, wird der Skalierungsfaktor ε_{FE} darauf kalibriert: Gleichung (4.21).

4.3.4 Parameterauswahl für eine Sensitivitätsanalyse

Nachdem das Kostenmodell entwickelt und parametrisiert wurde, wird es in Kapitel 5.5 auf die zu untersuchenden Fahrzeugkonzepte angewendet. Bei der Durchführung von Gesamtkostenanalysen wird in der DIN EN 60400-3-3 eine Sensitivitätsanalyse durch Parametervariationen empfohlen [209].

Dazu werden die Parameter Kalkulationszinsfuß, Strompreis, Herstellkosten, Lohnkosten, Energieverbrauch, Batteriepreis, Batterielebensdauer, Haltedauer, Fahrleistung und Verhältnis von Transport- zu Fahreinheiten um jeweils $\pm 25\%$, orientiert an einer Annahme der DIN EN ISO 14044 [256], variiert. In einer weiteren Parametervariation wird die Batterielebensdauer der Lebensdauer der Fahreinheiten gleichgesetzt.

4.4 Entwicklung eines Ökobilanzmodells

Für eine möglichst ganzheitliche Bewertung neuartiger Fahrzeugkonzepte wird das Bewertungsmodell gemäß Kapitel 1.3 um eine Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA) ergänzt. Erste LCA für automatisierte, elektrifizierte oder geteilte Fahrzeuge existieren bereits, wie im Stand der Forschung skizziert wird: Kapitel 4.4.1. Für neuartige, modulare Fahrzeugkonzepte (Kapitel 2) wurde bislang keine Ökobilanz durchgeführt, weshalb in den Kapiteln 4.4.2–4.4.6 ein geeignetes Vorgehen entwickelt wird.

4.4.1 Bestehende LCA elektrischer und fahrerloser Fahrzeuge

Bei der Bewertung der Umweltwirkungen können verschiedene Bewertungsansätze durchgeführt werden: Während einige Studien in der Literatur Fahrzeuge bezüglich ihrer CO₂- bzw. Treibhausgasbilanz untersuchen [257, 258], bilanzieren andere deren Energieverbrauch [257, 259, 260]. Die ökologischen Auswirkungen von Produkten sind allerdings deutlich umfangreicher. Daher werden in der in DIN EN ISO 14040 und 14044 definierten Ökobilanz-Methode (Life Cycle Assessment, LCA) verschiedene Umweltfaktoren untersucht [256, 261]: neben dem Treibhauspotenzial z. B. die Versauerung von Böden, die Flächennutzung oder die Auswirkungen der Emissionen auf die menschliche Gesundheit. In einem Memorandum des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz

und Reaktorsicherheit und des Umweltbundesamts wird die Ökobilanz als fundiertere Grundlage für Entscheidungen gegenüber CO₂-Bilanzen vorgezogen [262].

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit elektrischen, automatisierten und neuartigen, modularen Fahrzeugkonzepten im Mobilitätssystem Stadt. Existierende Ökobilanzen in diesem Umfeld werden im Folgenden zusammengefasst. Im Vergleich mit verbrennungsmotorisch betriebenen Fahrzeugen haben **Elektrofahrzeuge** geringe Treibhausgasemissionen [244, 245, 263]. Vor allem die Nutzungsphase der Elektrofahrzeuge ist vorteilhaft, muss heute aber noch den Emissionsrucksack aus der Produktion kompensieren [249, 263]. Dabei hat vor allem die Traktionsbatterie einen erheblichen Einfluss auf die Lebenszyklus-Emissionen [249, 264, 265]. Technische Fortschritte unter anderem bei umweltverträglicher Zellchemie [249], einer höheren Fahrzeug- und Batterieleistung [266] sowie einem Strommix mit erhöhtem Anteil erneuerbarer Energien [266–268] reduzieren die Umweltwirkungen von Elektrofahrzeugen weiter.

Durch **automatisiertes Fahren** werden verschiedene Effizienzpotenziale erwartet (z. B. Platooning, effizienteres Fahrverhalten, Reduktion des Fahrzeuggewichts durch weniger Safety-Komponenten) [40, 259], welche zum einen bereits hinsichtlich des Energiebedarfs [257, 259, 260, 269] und zum anderen hinsichtlich der Treibhausgase [257, 270] untersucht wurden. Auch wurden bereits prospektive LCA zu automatisierten Fahrzeugen durchgeführt: Die Automatisierungskomponenten verursachen zunächst eine Steigerung der Umweltwirkungen, führen aber zu Effizienzverbesserungen, die die zusätzlichen Umweltwirkungen je nach Studie kompensieren oder sogar überkompensieren können [40, 271].

Zumeist durch Automatisierung induzierte Änderungen der Mobilität werden ebenfalls hinsichtlich ihrer Umweltwirkung untersucht, allerdings bislang größtenteils in CO₂- und Energiebedarfsbilanzen anstatt in vollständigen LCA. On-Demand **Mobilitätsdienstleistungen** [270] sowie Ridesharing und Ridepooling [272, 273] bewirken eine Verringerung der Umweltwirkungen.

4.4.2 Normative Grundlagen für eine Ökobilanzierung

Eine prospektive Ökobilanz untersucht zukünftige Entwicklungen statt etablierter Produkte. Da neuartige Fahrzeugkonzepte einen mit Serienprodukten gesättigten Markt mit urbanem Personen- und Güterverkehr adressieren, werden sie mit etablierten Serienprodukten vergleichend bewertet [274]. Bei prospektiven Untersuchungen besteht eine Herausforderung in der Datenqualität, die für die neuartigen Fahrzeugalternativen nicht in derselben Form vorliegt wie für die Serienprodukte. Vielmehr müssen in der Regel Prototypen- oder Laborbedingungen extrapoliert werden [274, 275]. Sensitivitätsanalysen werden durchgeführt, um Faktoren zu identifizieren, die einen großen Einfluss auf die Ökobilanz haben. Der Vorteil einer prospektiven LCA besteht darin, dass mit deren Erkenntnissen die Produktentwicklung noch beeinflusst werden kann [275].

Die LCA-Methodik ist in den Normen DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 definiert [256, 261]. Erstere beschreibt die Prinzipien und den Rahmen, letztere die Anforderungen an eine LCA-Studie. Eine Ökobilanz ist in **vier Phasen** zu unterteilen: (1) Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens, (2) Sachbilanz (engl. Life Cycle Inventory, LCI), (3) Wirkungsabschätzung (engl. Life Cycle Impact Assessment, LCIA) und (4) Auswertung der Ergebnisse (inklusive Sensitivitätsanalysen) [261]. In den folgenden Kapiteln wird ein Modell zur Ökobilanzierung neuartiger Fahrzeuge erarbeitet.

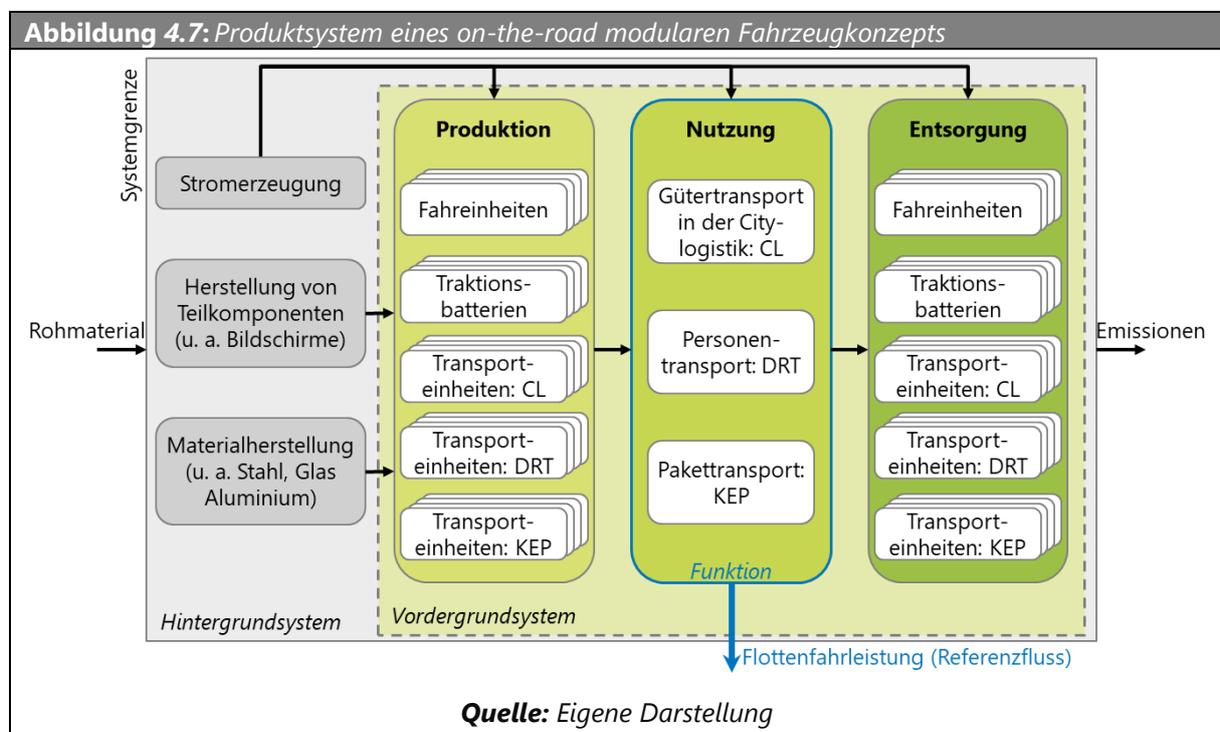
4.4.3 Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen

In der ersten Phase der LCA werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen, einschließlich aller grundlegenden Annahmen, festgelegt [261]. Dazu gehört unter anderem die Beschreibung des Produktsystems, der funktionellen Einheit und des Allokationsverfahrens.

Durch die Einführung neuartiger Fahrzeugkonzepte ändert sich nicht nur das Fahrzeug selbst, sondern auch das Einsatzszenario (Kapitel 4.1). Daher wird das LCA-Vorgehen methodisch so angepasst, dass on-the-road modulare sowie integrale Fahrzeuge einheitlich analysiert werden können. Dafür ist eine **systemische Betrachtung** der gesamten Flotte notwendig. Der Vergleich einzelner Fahrzeuge würde die Ergebnisse

verzerrten, da Effizienzvorteile neuartiger Fahrzeugkonzepte nicht berücksichtigt würden. Flottenbetrachtungen wurden in LCA bereits durchgeführt [276], aber bislang nicht für neuartige Fahrzeugkonzepte nach Kapitel 2.

Damit das LCA-Modell sowohl für integrale als auch on-the-road modulare Fahrzeugkonzepte angewendet werden kann, müssen sowohl Fahr- als auch Transporteinheiten in einem **Produktsystem** betrachtet werden. In einer exemplarischen Anwendung werden analog zum Vorgehen in Kapitel 4.1 Personen sowie Güter für die Citylogistik und Pakete im KEP-Segment transportiert. Daraus leitet sich das in Abbildung 4.7 dargestellte Produktsystem für on-the-road modulare Fahrzeugkonzepte ab.



Entsprechend der Empfehlung für prospektive LCA wird der gesamte Lebenszyklus (cradle-to-grave: Produktion, Nutzung, Entsorgung) berücksichtigt, wodurch eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher, aber funktionell äquivalenter Produkte gewährleistet ist [275, 277]. Die Produktion, Nutzung und Entsorgung der Fahr- und Transporteinheiten werden mit Primärdaten modelliert. Der Prozess für die Stromerzeugung wird für das Modell ebenfalls neu erstellt, um verschiedene Zusammensetzungen des

Strommix abbilden zu können. Vorhandene Datensätze und Sekundärdaten werden unter anderem für den Rohstoffabbau und die Produktion von Fahrzeugteilkomponenten verwendet. Die Sachbilanzdaten werden in den Kapiteln 4.4.4 und 5.6.1 spezifiziert.

In dem komplementären Modell für integrale Fahrzeuge müssen die Transporteinheiten entfernt werden, andererseits werden verschiedene Fahrzeuge für den Personen- und Gütertransport benötigt. Der vereinheitlichte Modellaufbau und die gleichen Systemgrenzen erlauben den Vergleich der Fahrzeugkonzeptalternativen.

In einer LCA beschreibt der Referenzfluss die Produktmenge, die benötigt wird, um die funktionelle Einheit (zentraler Referenzwert der Ökobilanz) zu erfüllen [261]. Die Wahl der **funktionellen Einheit** und damit der Referenzfluss kann die Ökobilanz signifikant beeinflussen [278]. Der Referenzfluss wird im Fahrzeugbereich je nach Studie auf Tonnenkilometer [279], Personenkilometer [272, 280] oder Fahrzeugkilometer [279, 281] bezogen. Für Anwendungsfälle, die sowohl den Güter- als auch den Personentransport umfassen, wird der Referenzfluss für die LCA neuartiger Fahrzeugkonzepte im kombinierten Transport auf die neutrale Einheit Fahrzeugkilometer bezogen. In Tabelle 4.8 werden die funktionelle Einheit und der Referenzfluss für vorliegende LCA definiert.

Tabelle 4.6: Definition der funktionellen Einheit und des Referenzflusses für die LCA modularer und integraler Fahrzeugkonzepte

Funktion	Transport von Personen und Gütern
Funktionelle Einheit	Durchführung des quantifizierten Transportbedarfs der Referenzanwendung
Referenzfluss	Flottenfahrleistung, die erforderlich ist um die funktionelle Einheit zu erfüllen (unterscheidet sich je nach Fahrzeugkonzeptalternative)

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Die folgenden Annahmen und Systemgrenzen ergänzen den Untersuchungsrahmen:

- Für eine Anwendung in Deutschland wird, soweit vorhanden, eine nationale Datengrundlage verwendet, ansonsten werden europäische Verhältnisse angenommen.

- Zukünftige technologische Rahmenbedingungen werden unterstellt, insbesondere die Verfügbarkeit fahrerloser Fahrzeuge und ein höherer Anteil erneuerbarer Energieträger am Strommix.
- Bei der Auswahl vorhandener Ökobilanz-Datensätze wird berücksichtigt, dass wiederverwendbare Abfallprodukte nach der cut-off-Methode allokiert werden. Diese Methode entspricht der europäischen Abfallhierarchie und begünstigt den Einsatz von Recyclingmaterial [282].
- Das Abschneidekriterium nach DIN EN ISO 14040 wird auf 1 % der Masse festgelegt, somit werden alle Teilkomponenten, die weniger als 1 % der Masse einer Fahr- oder Transporteinheit ausmachen, aus der Betrachtung ausgeschlossen.
- Traktionsbatterien haben erfahrungsgemäß einen erheblichen Einfluss auf die Ökobilanz [264, 265]. Da deren Lebenserwartung von der der Fahrzeuge abweicht [263, 283], wird davon ausgegangen, dass die Traktionsbatterien während des Betriebs ausgetauscht werden.
- Der Straßenbau, ergänzende Automatisierungs- und Vernetzungskomponenten in der Infrastruktur sowie die Ladeinfrastruktur werden für alle Fahrzeugkonzepte in der Ökobilanz als ähnlich angenommen und deshalb vernachlässigt.

4.4.4 Modellierung der Stoffströme für die Sachbilanz

In der **Sachbilanz** werden alle relevanten Daten für die Prozesse innerhalb der Systemgrenzen des Produktsystems gesammelt. Alle Eingangs- und Ausgangsdaten der Prozesse werden auf den Referenzfluss skaliert (Tabelle 4.6) [256]. Die Daten werden für die neuartigen Fahrzeugkonzepte bevorzugt aus Primärdaten erhoben und um Experteneinschätzungen sowie Literaturangaben ergänzt. Zudem werden Standardprozesse der ecoinvent-Datenbank (3. Version [284]) entnommen, welche als non-profit Organisation konsistente Sachbilanzdaten für Ökobilanzen zur Verfügung stellt. Die Sachbilanzdaten der untersuchten Fahrzeuge werden bei der Anwendung des LCA-Modells in Kapitel 5.6.1 spezifiziert.

Auf Basis der Sachbilanz werden die **Stoffströme** der Ökobilanz modelliert. Die Modellierung wird in der Software Umberto[®] LCA+ Version 10.0, Build 10.0.3.182 der ifu Hamburg GmbH (kurz: Umberto) umgesetzt [285]. Mit Umberto können die Stoffströme erstellt und zudem die Wirkungsabschätzung (Kapitel 4.4.5) durchgeführt werden. Für die Modellierung von Fahrzeugkonzepten, die sowohl im Güter- als auch Personenverkehr eingesetzt werden, wird das Stoffstrommodell zum einen hinsichtlich der Produktions-, Nutzungs- und Entsorgungsphase unterteilt. Zum anderen erfolgt eine Unterteilung hinsichtlich der verschiedenen Transportaufgaben, da je nach Einsatzzweck verschiedene Fahr- und Transporteinheiten eingesetzt werden. Stoffstrommodelle on-the-road integraler und modularer Fahrzeugkonzepte sind in Anhang K dargestellt.

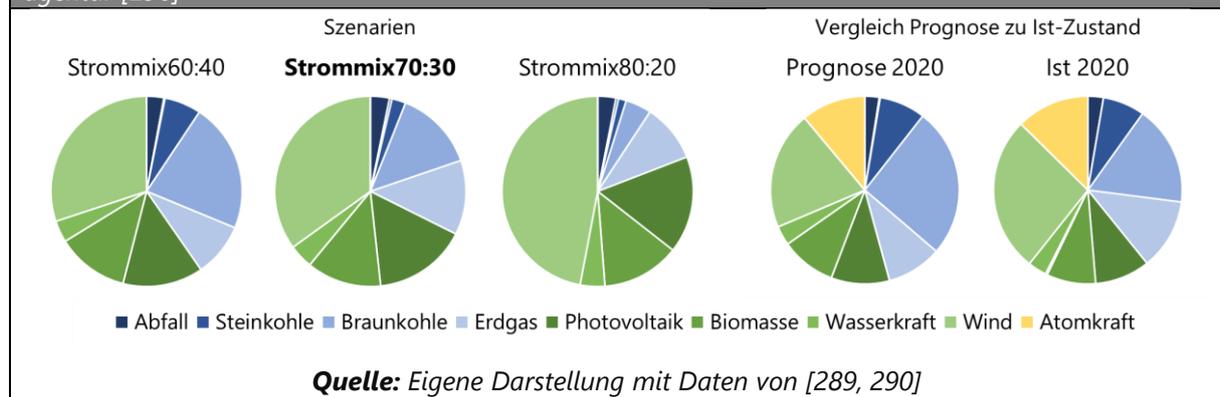
In der **Produktionsphase** werden die Prozesse für die Herstellung der Fahr- und Transporteinheiten modelliert. Standardprozesse werden der ecoinvent-Datenbank entnommen. Nicht verfügbare Sachbilanzen von Teilkomponenten neuartiger Fahrzeugkonzepte werden nach Materialzusammensetzung und Gewichtsangabe auf Basis von Primärdaten sowie Literaturannahmen erstellt. Darauf aufbauend werden die Modelle in Umberto umgesetzt. Für Standardprozesse wie der Stahlherstellung werden ecoinvent-Datensätze eingesetzt. In der **Nutzungsphase** wird für jeden Einsatzzweck der Personen- und Güterbeförderung ein Transportprozess modelliert. Der Gesamttransport (funktionelle Einheit) setzt sich aus diesen zusammen und ist der Prozess, auf welchen die Ökobilanz referenziert wird. In der Nutzungsphase entstehen Emissionen aus dem Energieverbrauch sowie Nicht-Abgas-Emissionen durch den Fahrvorgang. Diese korrelieren linear mit dem Fahrzeuggewicht: Emissionen durch Bremsabrieb, Straßenabnutzung und Reifenabrieb betragen 0,89 µg, 9,83 µg bzw. 57,29 µg je Fahrkilometer und aggregierter Masse aus Fahr- und Transporteinheit [286]. Das Vorgehen in der **Entsorgung** orientiert sich an der aktuellen Praxis [287, S. 412–413]. In dieser Phase werden den Fahr- und Transporteinheiten zunächst Batterien, Betriebsflüssigkeiten, Schadstoffträger und separat verwertbare Komponenten, wie Glas, Reifen, Aluminiumteil etc., entnommen. Anschließend wird die Karosserie gepresst und geschreddert. Die

Materialtrennung wird im Stoffstrom modelliert, während für die Endprozesse ecoinvent-Datensätze verwendet werden [288].

Je nach Prozess im LCA-Modell wird Strom in Hoch-, Mittel- oder Niederspannung benötigt. Da sich der **Strommix** signifikant auf das Ergebnis auswirken kann [266–268] und sich der Stromdatensatz aus ecoinvent auf das Jahr 2014 bezieht, wird ein Strommixmodell in Umberto modelliert, dessen Energieträger-Zusammensetzung angepasst werden kann und das verschiedene Spannungsebenen abbildet. Z. B. wird für das Laden der Traktionsbatterien in der Nutzungsphase ein Niederspannungsnetz eingesetzt, während Prozesse in der Herstellung und Entsorgung Strom der Mittel- und Hochspannungsebene verwenden. Als Basis für die LCA wird ein perspektivisches Strommixszenario mit 70 % Anteil an erneuerbaren Energieträgern verwendet (Abbildung 4.8), welches auf der Energierferenzprognose des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie basiert und bis 2040 erreicht werden soll [289]. Der Abgleich der Prognose für das Jahr 2020 zeigt eine hohe Übereinstimmung mit den historischen Daten der Bundesnetzagentur (höchstes Delta bei Braunkohle mit -9 % und Wind mit +6 %) [290].

Abbildung 4.8: Strommixszenarien – Zusammensetzung nach Energieträgern

Benennung der Szenarien nach dem Anteil erneuerbarer zu fossiler Energieträger; die Szenarien basieren auf der Energierferenzprognose des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aus dem Jahr 2014 [289]; „Prognose 2020“ ist dieser entnommen; „Ist 2020“ zeigt historische Daten der Bundesnetzagentur [290]



Eine methodische Besonderheit bei der LCA neuartiger, modularer Fahrzeugkonzepte ist die Zusammensetzung aus Fahr- und Transporteinheiten, wobei die Einheiten eine **unterschiedliche Lebensdauer** aufweisen. Die Produktions- und Entsorgungsprozesse

der Fahr- und Transporteinheiten werden daher anteilig auf den Referenzfluss bezogen. Dazu wird Formel (4.22) eingeführt, welche die Anteile MA aus der Lebensdauer der Einheiten E sowie deren Masse m berechnet. Die Lebensdauer korreliert mit der Laufleistung bis ans Lebensende (End of Life, EoL) FL^{EoL} über die jährliche Fahrleistung im Einsatzszenario unter der Annahme, dass diese auch nach der Haltedauer gleich bleibt.

$$MA_E = \frac{m_E}{FL_E^{EoL}} \quad (4.22)$$

mit MA_E : Massenanteil von E am Transport über 1 km [kg/km];
 E : Fahreinheit oder Transporteinheit; m : Masse [kg];
 FL_E^{EoL} : Fahrleistung von E bis ans Lebensende (EoL) [km]

Die Lebenserwartung der Traktionsbatterien kann von der der Fahr- und Transporteinheiten abweichen [263, 283]. Daher werden die Traktionsbatterien in Stoffstrom separat modelliert und entsprechend des Vorgehens im ecoinvent-Datensatz für elektrische Antriebe das Batteriegewicht nach Formel (4.23) skaliert (abgeleitet aus [286]). Anschließend werden die durch Batterien verursachten Umweltwirkungen anteilig nach Formel (4.22) auf den Referenzfluss bezogen.

$$m_{Bat,skal} = \frac{m_{Bat} T_E^{EoL}}{T_{Bat,E}^{EoL}} = \frac{m_{Bat} FL_E^{EoL}}{FL_{Bat,E}^{EoL}} \quad (4.23)$$

mit $m_{Bat,skal}$: skaliertes Batteriegewicht [kg];
 m_{Bat} : Ausgangsgewicht der Batterie [kg];
 T_E^{EoL} : Lebensdauer der Einheit E [Jahre];
 $T_{Bat,E}^{EoL}$: Lebensdauer der Batterie in Einheit E [Jahre];
 FL_E^{EoL} : Fahrleistung bis an das Lebensende [km]

4.4.5 Auswahl relevanter Wirkkategorien

Bei der Wirkungsabschätzung werden die Sachbilanzergebnisse mit Hilfe von Charakterisierungsfaktoren in Kategorien unterschiedlicher Umweltwirkung umgerechnet: z. B. wird die Wirkung der Teilprozesse im Produktsystem auf den Klimawandel in

Kohlenstoffdioxidäquivalente (CO₂-Äq) berechnet. Für die Wirkungsabschätzung existieren verschiedene Methoden [291], von denen in dieser Arbeit die **ReCiPe-Methode** (Version 1.13 von 2008) angewendet wird, da sie die relevantesten Wirkkategorien für den Verkehrssektor umfasst [292, 293]. Tabelle K.1 in Anhang K definiert die ReCiPe-Mittelpunktkategorien und deren Indikatoren.

Aus den 18 Mittelpunktkategorien werden die Wirkkategorien Klimawandel (GWP)¹⁹, terrestrische Versauerung (TAP), Humantoxizität (HTP), photochemische Ozonbildung (POFP), Feinstaubbildung (PMFP), Wasserverknappung (WDP) und Mineralienabbau (MDP) detailliert untersucht. Die Auswahl orientiert sich an einer für die EU entwickelten LCA-Methodik für Nutzfahrzeuge [279] und einer Literaturübersicht der am häufigsten in LCA zu Elektrofahrzeugen verwendeten Wirkkategorien [245].

4.4.6 Parametervariation für eine Sensitivitätsanalyse

Im Folgenden werden die Parameter identifiziert, die die Ökobilanz potenziell maßgeblich beeinflussen. Hierzu werden in Kapitel 5.6 Sensitivitätsanalysen durchgeführt um zu prüfen inwiefern sie das vorliegende LCA-Modell beeinflussen. Aus der existierenden LCA zu Elektrofahrzeugen sind unter anderem die folgenden **kritischen Einflussfaktoren** bekannt: der verwendete Strommix [266–268], die Traktionsbatterie [264, 265], die Lebensdauer [266], das Fahrverhalten [294], die Straßenverhältnisse, die Wartung und der Verkehrsfluss [268], wobei der zentrale Einfluss in der Produktion der Traktionsbatterie besteht [265]. Die Wartung wird entsprechend des Untersuchungsrahmens im Modell nicht berücksichtigt. Die Straßenverhältnisse und der Verkehrsfluss werden für alle Fahrzeugkonzepte als gleich angenommen, da die Fahrzeuge in derselben Referenzanwendung eingesetzt werden. Das Fahrverhalten wird indirekt über den ermittelten Energieverbrauch der Fahrzeugkonzeptalternativen berücksichtigt.

¹⁹ Im Folgenden wird auch mit den Indikatoren bzw. deren Abkürzung auf die Wirkkategorie referenziert, z. B. für Klimawandel mit dem Treibhauspotenzial (GWP). Die Indikatoren aller Wirkkategorien sind in Tabelle K.1 aufgeführt.

Für die Sensitivitätsanalyse des Ökobilanz-Modells wird der Strommix entsprechend Abbildung 4.8 in einen Strommix mit einem höheren und einen Strommix mit einem geringeren Anteil erneuerbarer Energieträger variiert. Der Einfluss der Traktionsbatterie wird indirekt über die Änderung des Energieverbrauchs untersucht. Dabei wird davon ausgegangen, dass ein erhöhter Energieverbrauch zu einem proportionalen Anstieg der Kapazität der Antriebsbatterien führt, um die Reichweitenanforderung einzuhalten. Zusätzlich wird die Lebensdauer für mehrere Komponenten variiert: Für die Fahrereinheiten und die Traktionsbatterien wird die lebenslange Laufleistung angepasst und für die Transporteinheiten wird die kalendarische Lebensdauer variiert.

Neben den genannten Parametern Strommix, Energieverbrauch und Lebensdauer werden Einsatzszenario-spezifische Parameter verändert, um auch den Einfluss der Anwendung zu untersuchen: Fahrleistung, Flottengröße von Fahr- (FE) und Transporteinheiten (TE) sowie das Verhältnis von TE zu FE. Die Höhe der Parametervariation wird für diese Arbeit mit $\pm 25\%$ festgelegt und orientiert sich damit an einer Annahme der DIN EN ISO 14044.

4.5 Methodik zur Einschätzung prospektiver Technologieentwicklungen

In vorliegender Arbeit werden Fahrzeugkonzepte untersucht, die noch nicht am Markt in Serie verfügbar sind. Für den potenziellen Einsatz der Fahrzeuge ist deren Verfügbarkeit jedoch ein entscheidendes Kriterium, welches auch in der Nutzenanalyse identifiziert wird (Kapitel 4.2.2). Insbesondere für potenzielle Betreiber der Fahrzeuge ist die Kenntnis über deren Verfügbarkeit für die Planung zukünftiger Betriebsabläufe relevant [27, 28, S. 26–28, 186, S. 92–93]. Im Folgenden wird eine Methodik erarbeitet mit der die prospektive Verfügbarkeit von Technologien und damit der Fahrzeuge bestimmt werden kann. Dazu werden zunächst unterschiedliche Prognosemethoden erläutert (Kapitel 4.5.1) und daraus ein geeignetes Vorgehen für diese Arbeit abgeleitet.

4.5.1 Bekannte Ansätze zur Prognose von Technologieentwicklungen

Für die Prognose der zukünftigen Entwicklung von Technologien existieren verschiedene Ansätze, die in die Gruppen Monitoring, Trendanalyse, Simulation, Expertenbefragung und Szenario unterteilt werden können [295, 296].

Für Vorhersagen zur Entwicklung autonomer Fahrzeuge werden im Rahmen von **Monitoring**-Methoden z. B. Publikations- [43, 44] und Patentanalysen [43, 45] sowie ergänzende Textanalysen (Text Mining) [44] und Lebenszyklusmodelle angewendet. Allerdings prognostizieren die wenigsten Studien eine zeitliche Entwicklung, sondern identifizieren vor allem die für selbstfahrende Fahrzeuge relevanten Technologien. Durch die Kombination mit Lebenszyklusmodellen, einem Ansatz aus der **Trendanalyse**, bei dem auf Basis von historischen Daten vergleichbarer Technologien Wachstumskurven abgeleitet werden [295], wird die zeitliche Entwicklung automatisierten Fahrens untersucht [43, 45]. Modelle und **Simulationen** vereinfachen reale Systeme, um Erkenntnisse und Aussagen über deren zukünftiges Verhalten abzuleiten [296]. In der Literatur existieren Arbeiten zu agentenbasierten Modellen zur Entwicklung des Marktes für Elektrofahrzeuge [297–299] sowie für die Marktakzeptanz autonomer Fahrzeuge [300]. Sind strukturierte bzw. quantitative Informationen nicht verfügbar, werden üblicherweise Methoden der **Expertenbefragung** eingesetzt: Interviews, Umfragen, Delphi-Befragungen, Workshops etc. [295, 296]. Im Automobilsektor wurden z. B. Delphi-Befragungen eingesetzt, um Aussagen zu Treibern und Hindernissen des Carsharings [301] sowie zu technologischen Entwicklungen nachhaltiger Produktion [302] abzuleiten. **Szenarien** ermöglichen eine qualitative Darstellung von Zukunftsmöglichkeiten, selbst wenn die Datengrundlage schwach ist [295, 296]. In einem Expertenworkshop sind z. B. Szenarien für die Einführung von autonomen Fahrzeugen und deren Auswirkungen auf das Mobilitätsverhalten entstanden [46].

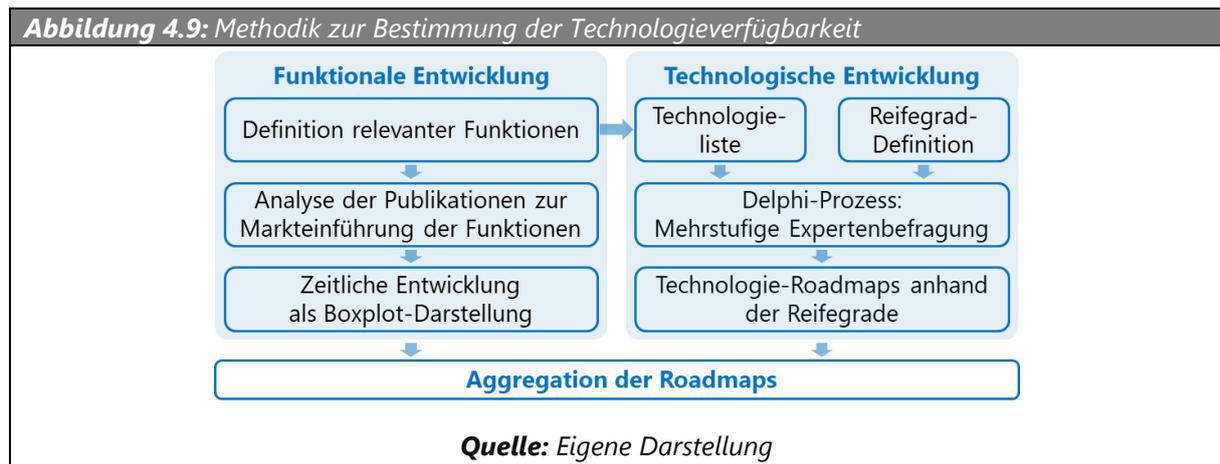
Technologie-Roadmapping wird in der Industrie häufig für die strategische Planung im Technologiemanagement eingesetzt, um verschiedene Einführungspfade zukünftiger Technologien oder Produkte aufzuzeigen [303].

Welche Methode sich am besten für die Prognose prospektiver Technologieentwicklungen eignet, hängt von der Verfügbarkeit von Daten und Erkenntnissen über vergleichbare Technologien ab [304]. Delphi-Expertenbefragungen sind geeignet, wenn die Datenlage für andere Prognosemethoden nicht ausreichend ist [296, 304].

4.5.2 Vorgehen zur Aggregation funktionaler und technologischer Roadmaps

Die in vorherigem Kapitel beschriebenen Ansätze zur Technologievorhersage sind mit Unsicherheiten behaftet, eine Kombination mehrere Methoden kann diese Unsicherheit jedoch reduzieren [43, 45]. Dieser Erkenntnis folgend soll die erarbeitete Methode mehrere Ansätze kombinieren und zudem mit begrenztem Aufwand und Vorwissen anwendbar sein; ein Bedarf, der vor allem für den Transfer in kleinere und mittlere Unternehmen identifiziert wurde [27, 28, S. 190–191]. Dazu werden in dieser Arbeit die Methoden der Delphi-Expertenbefragung und der Publikationsanalyse kombiniert.

Abbildung 4.9 zeigt die erarbeitete Vorgehensweise: Bei der **funktionalen Entwicklung** werden zunächst die Funktionen identifiziert, die durch ein neuartiges Fahrzeug ermöglicht werden (z. B. verschiedene Stufen der Automatisierung). In einer Publikationsanalyse werden anschließend Aussagen unterschiedlicher Quellen zur Marktreife der einzelnen Funktionen ausgewertet. Aufgrund des unstrukturierten Formats, in dem die Aussagen vorliegen (Pressemitteilungen, Abbildungen; Zeitspanne vs. diskrete Jahreszahlen) ist eine Vorverarbeitung der Daten erforderlich [305]. Die ermittelten Zeitpunkte der Markteinführung werden in einer funktionalen Roadmap mittels Boxplot-Diagramme dargestellt, wodurch neben Angaben zu Mittelwert und Median auch statistische Informationen zu Ausreißern dargestellt werden können.



Für die **technologische Entwicklung** werden Technologien identifiziert, die für die Erfüllung der Funktionen erforderlich sind. Anschließend bewerten Experten in einer zweistufigen Delphi-Befragung anhand von Reifegraden die zeitliche Entwicklung dieser Technologien, welche in einer Technologie-Roadmap dargestellt wird. In Abschnitt 4.5.3 werden die Delphi-Methodik beschrieben und geeignete Reifegrade definiert.

Die Ergebnisse beider Ansätze werden in einer **Gesamt-Roadmap** zusammengeführt. Der Abgleich der funktionalen mit der technologischen Entwicklung zeigt potenzielle Abhängigkeiten sowie Diskrepanzen auf und bietet damit eine fundierte Grundlage zur Ableitung der Marktreife von Funktionen und Produkten.

4.5.3 Delphi-Befragung zu Technologie- und Herstellungsreifegraden

Die Delphi-Expertenbefragung wurde in den 1950er Jahren von der RAND-Corporation in den USA entwickelt und wird unter anderem für die Technologievorhersage verwendet [306]. Ein Expertenpanel wird in einem mehrstufigen, anonymisierten Prozess mehrmals befragt, wobei die Antworten nach jeder Befragungsrunde für die nächste Runde konsolidiert werden. Durch die Antworten der anderen Teilnehmenden werden die Befragten dazu angeregt, ihre ursprüngliche Antwort zu überdenken, zu begründen, zu bestätigen oder zu ändern. Dieser Prozess muss mindestens zweimal durchgeführt werden, wonach entweder ein Konsens erreicht wird oder Differenzen ausreichend begründet sind [185, 306].

Für das **Expertenpanel** werden wissenschaftliche Volltextdatenbanken (Scopus, IEEE Xplore und Web of Science) nach Autoren und Autorinnen durchsucht, welche entweder häufig zitiert werden oder selbst viele Veröffentlichungen haben. Zudem werden Industriekontakte mit einbezogen, sodass ein heterogenes Panel mit internationalen und nationalen Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie entsteht.

Um sowohl **Technologie- als auch Herstellungsreifegrade** zu berücksichtigen, wurden diese in einer neuen Reifegradeinteilung vereint: Tabelle 4.7. Diese Definition beruht auf einer Kombination des Technology Readiness Levels (TRL) der NASA [307] mit dem Manufacturing Readiness Level (MRL) des Automotive Council UK [308]. Während die ersten Stufen Entwicklungen in der Grundlagenforschung adressieren, beziehen sich die weiteren Stufen, beginnend mit TRL 5-8, auf eine Anwendung der Technologie in der Automobilindustrie. Die Technologie-Roadmap zeigt mögliche Technologieentwicklungspfade über die Zeit auf. Ob sich daraus eine am Markt erfolgreiche Innovation etabliert, hängt wesentlich von den Geschäftsmodellen sowie den externen Randbedingungen ab.

Tabelle 4.7: <i>Definition von Technologie- und Herstellungsreifegraden</i>		
Nr.	Bezeichnung	Beschreibung
TRL 1	Grundlagenforschung	Naturwissenschaftliche Grundprinzipien beobachtet; wissenschaftliche Forschung durchgeführt
TRL 2-4	Technologische Forschung	Technologiekomponente in Labor validiert; grundlegendes Konzept in anderen Branchen umgesetzt; Wechselwirkungen mit relevanten Fahrzeugsystemen ermittelt
TRL 5-8	Produktdemonstration	Testphase abgeschlossen; Technologie in endgültiger Form unter erwarteten Bedingungen bewährt
MRL 8	Erste Produktion	Pilotfertigung demonstriert; erste Lieferbeziehungen etabliert
MRL 9	Fähigkeit zur Massenproduktion demonstriert	Herstellung erfolgt in Einzel- oder Kleinserien; wichtigsten Merkmale des Systemdesigns sind stabil und in Tests bewährt; Materialien sind für geplante Massenproduktion verfügbar
MRL 10	Erfolgreiche Massenproduktion bewährt	Konstruktive Änderungen beschränken sich auf Qualitäts- und Kostenverbesserungen; Produkt in Serienproduktion

Quelle: basierend auf [307, 308], bereits in Ulrich et al. (2022) veröffentlicht [309]

Die erarbeitete Methode wird in Kapitel 6.1 angewendet, um die prospektive Technologieverfügbarkeit der untersuchten Fahrzeugkonzepte abzuleiten. Dazu wird zunächst über eine Expertenbefragung ermittelt, welcher Technologiebereich (z. B. Elektrifizierung oder Automatisierung) die Einführung der neuen Fahrzeuge am stärksten verzögert. Auf diesen Bereich wird die Methode angewendet, wobei deren Marktreife der frühestmöglichen Verfügbarkeit von neuartigen Fahrzeugkonzepten entspricht. Es werden ausschließlich technologische Entwicklungen berücksichtigt, nicht jedoch gesetzliche und soziale Restriktionen.

4.6 Adaption der Disruptionstheorie auf Fahrzeugkonzepte

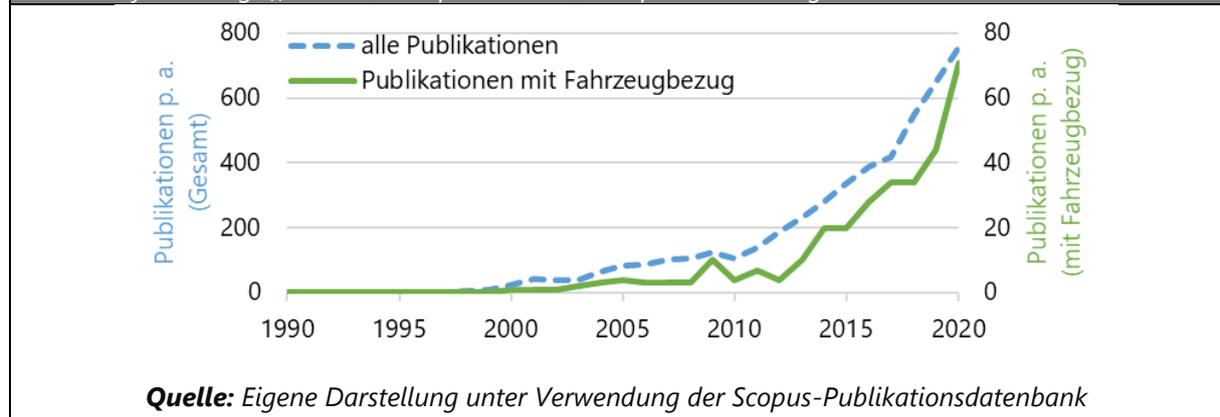
Der Eintritt von Disruptionen kann ex-ante, d. h. im Voraus, nicht zuverlässig bestimmt werden. Dies wird in Kapitel 4.6.1 basierend auf der Disruptionstheorie begründet. Daher wird in dieser Arbeit stattdessen das disruptive Potenzial von Fahrzeugkonzepten untersucht. Die Identifikation von potenziell disruptiven Fahrzeugkonzepten (PDFK) ermöglicht es Unternehmen, Chancen und Risiken rechtzeitig zu erkennen und Maßnahmen zu ergreifen, sich auf deren möglichen Eintritt vorzubereiten [29, 30].

4.6.1 Disruptionstheorie

Die Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung hat das Wort Disruption²⁰ 2015 zum Wirtschaftswort des Jahres gewählt [311]. Wie die Metaanalyse der Scopus-Publikationsdatenbank in Abbildung 4.10 zeigt, stieg die Nennung in den letzten Jahren auch in akademischen Texten sprunghaft.

²⁰ Definition von Disruption im Duden: einschneidende (meist zerstörerische) Veränderung [310].

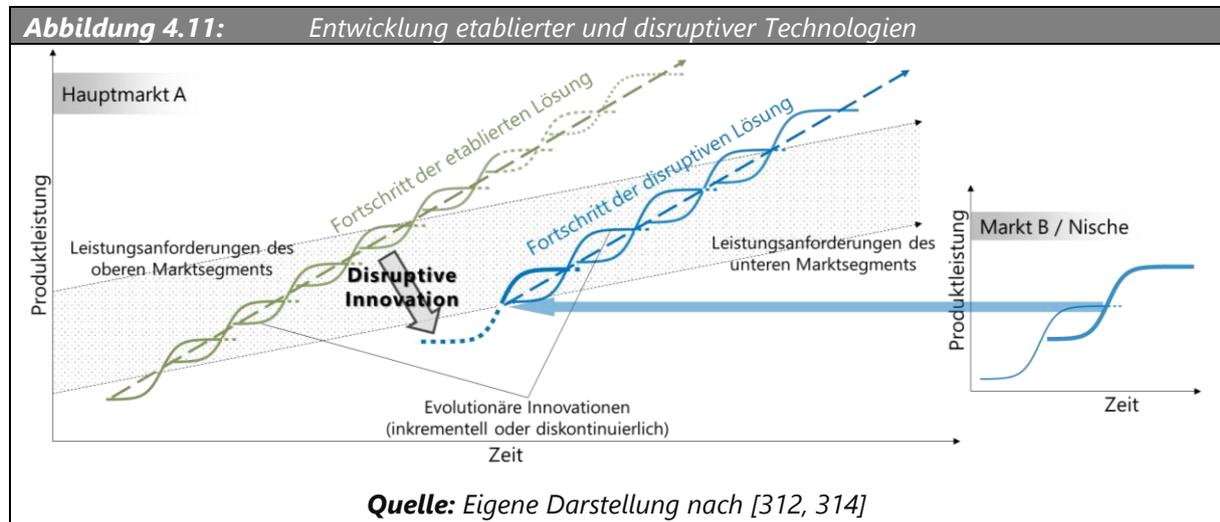
Abbildung 4.10: Anzahl wissenschaftlicher Publikationen zu Disruption
Metaanalyse zu Begriffen wie „Disruption“ oder „disruptive Technologie“



Sowohl in journalistischen als auch wissenschaftlichen Publikationen werden die Begriffe „Disruption“ und „disruptive Technologie“ nicht immer korrekt entsprechend der Definition von Clayton M. Christensen verwendet [29, 312]. Christensen spricht in seinen ersten Publikationen ausschließlich von disruptiven Technologien, erweitert den Begriff später aber auf disruptive Innovationen, da Technologien in der Regel erst durch entsprechende Geschäftsmodelle einen disruptiven Charakter entwickeln [313].

Evolutionäre Technologien verbessern bestehende Produkte oder Prozesse entsprechend der Anforderungen bekannter Kunden in einem etablierten Markt. Diese Verbesserung kann von inkrementeller oder diskontinuierlicher bzw. radikaler Natur sein [29, S. 6–10] und folgt in der Regel dem S-Kurvenkonzept nach Foster (1986) [314]. Richard N. Foster hat 1986 den Lebenszyklus einer Technologie als S-Kurve dargestellt, wobei die Verbesserungsrate der Technologie in der Anfangsphase gering ist, aber mit der Beherrschung und Verbreitung der Technologie im Laufe der Zeit zunimmt, bis sich das Weiterentwicklungspotenzial der Technologie in der Reifephase asymptotisch der Leistungsgrenze annähert [314]. Inkrementelle Verbesserungen finden auf einer S-Kurve statt, diskontinuierlicher Fortschritt bedeutet einen Wechsel auf eine neue S-Kurve. Beides erfolgt in einem etablierten Markt für etablierte Kunden [29, 314]. In der Automobilanwendung sind z. B. Verbesserungen, die Fahrzeuge schneller oder komfortabler machen, evolutionäre Innovationen [315]. Abbildung 4.11 stellt die typische

Entwicklung evolutionärer Technologien dar, wobei Christensen die S-Kurven als Gerade annähert. Nach einiger Zeit wird die Produktleistung so weit verbessert, dass sie die Leistungsanforderungen des oberen Marktsegments überschreitet [29, S. 7].



Disruptive Technologien erfüllen dagegen Bedürfnisse, die die Hauptkunden am oberen Marktsegment zu Beginn nicht haben (Abbildung 4.11). Sie werden zunächst in einer Nische des Hauptmarktes oder in einem völligen anderen Markt entwickelt. Später entwickeln sich die disruptiven Technologien weiter, bis sie auch die Anforderungen der Hauptkunden im Hauptmarkt erfüllen, und verdrängen etablierte Produktlösungen aus diesem Markt [29]. Typische Merkmale disruptiver Technologien entsprechend der Christensens Definition sind [29, 49, 316]:

- Zu Beginn haben sie signifikante Leistungsnachteile gegenüber konventionellen Produkten bei den Anforderungen der Hauptkunden.
- Sie haben Leistungsvorteile bei neuen Kriterien, die Kunden in Nischenmärkten schätzen (z. B. einfacher, billiger, kleiner, anwendungsfreundlicher).
- Sie sprechen zunächst ein preissensitives Kundensegment an.
- Zu Beginn ist ihre konkrete Anwendung bzw. der Zielmarkt nicht eindeutig.
- Etablierte Unternehmen interessieren sich zunächst nicht für sie, da ihre Hauptkunden andere Bedürfnisse haben.

- Sie entwickeln ihre Leistungsmerkmale im Nischenmarkt unbedroht weiter bis sie die Anforderungen der Kunden im Hauptmarkt erfüllen und schließlich die etablierten Technologien ablösen.

Gemäß Christensen et al. (2015) liegt eine Disruption auch dann vor, wenn keine vollständige Substitution der etablierten Technologien vorliegt, diese aber zurückgedrängt wird [317]. Beispiele für disruptive Technologien finden sich in verschiedenen Branchen: Christensen (1997) hat die Theorie disruptiver Technologien unter anderem anhand von Dampfschiffen und Hydraulikbaggern begründet, welche Segelschiffe respektive Seilbagger im Sinne einer Disruption abgelöst haben [29]. Weitere prominente Beispiele sind die Veränderung von Film- zu Digitalfotografie [29, S. 18] oder der Wandel von Fuhrwerken mit Zugtieren zu Automobilen Ende des 19. Jahrhunderts [318]. Ob sich Elektrofahrzeuge disruptiv gegenüber verbrennungsmotorischen Fahrzeugen verhalten, wird in der Literatur noch differenziert diskutiert [29, 30, 313].

Die vorherrschende Kritik an Christensens Theorie disruptiver Technologien besteht darin, dass die Erkenntnisse auf Studien zu historischen Fallbeispielen beruhen und die Grundgesamtheit der Beispiele gering ist [319, 320]. Entsprechend Gans (2016) können Disruptionen theorieinhärent nicht vorhergesagt werden, da sich ansonsten etablierte Unternehmen darauf vorbereiten und das disruptive Ereignis nie eintreten würde [321, S. 53–63].

Die **Bewertung des disruptiven Potenzials** wird in der Literatur verschiedentlich verfolgt [47, 313, 316, 322]. Die Ansätze zur ex-ante Bewertung werden nach Klenner et al. (2013) in

- (1) Scoring- und Analyseverfahren potenziell disruptiver Technologien [30, 47–49, 319, 323],
- (2) ökonomische Modelle zur potenziellen Marktdurchdringung [324, 325] sowie
- (3) Szenario- und Situationsanalysen [320, 326, 327] eingeteilt,

wobei (1) am häufigsten eingesetzt werden [30].

Die Scoring-Ansätze unterscheiden sich vor allem in der Auswahl der Kriterien, dem Untersuchungsgegenstand (Technologie oder Markt) und einer quantitativen oder qualitativen Analyse. Des Weiteren basieren Scoring- und Analyseverfahren entweder auf qualitativen Diskussionen [30, 313, 319, 323] oder einer Bewertung anhand (semi-)quantitativer Skalen [47–49, 322]. Letztere entsprechen im methodischen Vorgehen einer Nutzwertanalyse (Kapitel 4.1), da zunächst Kriterien für ein disruptives Potenzial definiert und anschließend auf einer mehrstufigen Skala bewertet werden.

In den folgenden Kapiteln wird die Disruptionstheorie auf neuartige Fahrzeugkonzepte übertragen und ein Vorgehen entwickelt, deren disruptives Potenzial zu bewerten.

4.6.2 Definition potenziell disruptiver Fahrzeugkonzepte

Gemäß des BMW-Finanzvorstands Nicolas Peter (2019) ist die Transformation der Automobilindustrie „in vollem Gange. In diesem Umfeld ist nachhaltig hohe Profitabilität entscheidend, um weiterhin Treiber des Wandels zu sein“ [328]. Eine Fokussierung auf die Haupt-Premiumkunden mit der größten Marge erhöht die Gefahr, dass potenziell disruptive Fahrzeugkonzepte (PDFK) entstehen, die die anderen Kunden im Markt bedienen [29]. So ordnen Klenner et al. (2013) den deutschen Automobilmarkt als anfällig für disruptive Innovationen ein, basierend auf einer hohen Marktreife, etablierten Herstellern, geringem Marktwachstum und einer etablierten Technologie [30].

Mit der folgenden Definition und den Bewertungskriterien potenziell disruptiver Fahrzeugkonzepte wird eine Grundlage geschaffen, mit der Akteure der Automobilbranche auch während des Transformationsprozesses potenzielle Disruptionen verfolgen und sich auf diese vorbereiten können.

Definitionen aus der Literatur (Kapitel 4.6.1) werden auf die Bewertung neuartiger Fahrzeugkonzepte adaptiert und das **disruptive Potenzial** als die Eigenschaft definiert, bestehende Elemente eines Systems zur Erfüllung einer den Kunden wichtigen Anwendung potenziell zu verdrängen. Fahrzeugkonzepte repräsentieren dabei Elemente in dem System „urbaner Personen- und Güterwirtschaftsverkehr“.

Die **Disruptionskriterien**, die ein potenziell disruptives Fahrzeugkonzept charakterisieren wurden für diese Arbeit aus Fachpublikationen abgeleitet: Tabelle 4.8. Der Grad der potenziellen Disruptivität eines Fahrzeugkonzepts steigt mit der Anzahl erfüllter Kriterien. Die Kriterien wurden in einer Online-Umfrage durch Expertinnen und Experten aus unterschiedlichen Bereichen des urbanen Wirtschaftsverkehrs bestätigt²¹ und werden in Form von Erfüllungsfragen im Anhang (Tabelle M.1) erläutert.

Tabelle 4.8: Kriterien disruptiven Potenzials neuartiger Fahrzeugkonzepte (PDFK)		
Erklärungen der Kriterien in Tabelle M.1		
ID	Kriterium	Quellengrundlage
D01	Eigentumsverhältnisse	[47], [329], [330], [331]
D02	Erster Markt	[48], [323]
D03	Geschäftsmodelländerung	[313], [48], [323], [319], [47], [49], [331]
D04	Wachstumschancen	in Anlehnung an Kriterium „erster Markt“
D05	Aufgabenerfüllung	[48]
D06	Umstellungsaufwand	[323]
D07	Funktionalität	[47], [329], [330]
D08	Initiale Leistungsnachteile	[29], [47], [323], [319], [49], [318], [48]
D09	Vorteile bei neuen Leistungskriterien	[29], [47], [318], [319], [320], [49], [48], [323], [332]
D10	Etablierte Konkurrenz	[29], [49], [48], [323], [318], [47]
D11	Marktdiffusion	[47], [48], [323]
D12	Technologische Diskontinuität	[49], [47], [329], [330], [323]
D13	Infrastrukturabhängigkeit	[47], [318], [313], [332], [323]
D14	Umfeldabhängigkeit	[47], [313], [332]
D15	Schadensrisiko ²²	Ergänzung in Anlehnung an [333–335]

Quelle: Eigene Zusammenstellung

²¹ Es werden dieselben Expertinnen und Experten befragt, die auch die Nutzenkriterien des erweiterten Nutzenmodells bewerten. Die Online-Umfrage wurde bereits in Kapitel 4.1 beschrieben; Anhang E führt die Expertise der Befragten auf.

²² Technische Störungen mit gravierendem Schadensausmaß inklusive Personenschäden können einem disruptiven Ereignis entgegenwirken. Das Kriterium „Schadensrisiko“ ergänzt die Kriterien aus der Literatur zur Disruptionstheorie, um diesen Umstand zu berücksichtigen. Z. B. haben Luftschiffe einige Merkmale disruptiven Potenzials erfüllt, konnten sich aber aufgrund mehrerer Unfälle, unter anderem der Zerstörung des Zeppelins LZ 129 Hindenburg in Lakehurst im Jahr 1937 mit 35 Toten [333, S. 238–240], nicht durchsetzen. Das Schadensrisiko wird als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit (Störanfälligkeit) und Schadensausmaß definiert [334, S. 24, 335, S. 123–125].

4.6.3 Vorgehen zur Bewertung des disruptiven Potenzials

In diesem Kapitel wird ein methodisches Vorgehen erarbeitet, mit dem das disruptive Potenzial neuartiger Fahrzeugkonzepte bewertet werden kann.

Dafür wird das Vorgehen von Scott D. Anthony²³ et al. (2008) adaptiert, welches nach Klenner et al. (2013) ein Scoring-Verfahren (Kapitel 4.6.1) darstellt und weitestgehend einer Nutzwertanalyse entspricht [30, 48, 186]: Zunächst werden Kriterien potenzieller Disruptivität erarbeitet und operationalisiert. Anschließend wird für jedes Fahrzeugkonzept der Erfüllungsgrad je Disruptionskriterium bewertet und visualisiert. Die Methode wird um ein Maß zur Unsicherheit der Bewertung ergänzt.

Wie bei anderen Arbeiten [48, 323] werden die Kriterien potenziell disruptiver Fahrzeugkonzepte gleich gewichtet. Welches Fahrzeugkonzept das jeweilige Disruptionskriterium am besten erfüllt (**Erfüllungsgrade**). Bei der Operationalisierung der Disruptionskriterien erfolgt eine Charakterisierung der Punktzahlen für die jeweiligen Kriterien in einer Wertetabelle²⁴: Tabelle M.2 im Anhang.

Die Erfüllungsgrade werden nach Formel (4.24) zu dem disruptiven Potenzial DP_{FK} der jeweiligen Fahrzeugkonzeptalternative aufsummiert.

$$DP_{FK} = \sum_i^{I^D} e_{i,FK}^D \text{ mit } i \in I^D, I^D = \{D01, \dots, D15\} \quad (4.24)$$

mit DP_{FK} : Disruptives Potenzial des Fahrzeugkonzepts FK;
 I^D : Menge der Disruptionskriterien; e : Erfüllungsgrad

Die Methodik von Anthony et al. (2008) wird um einen **Grenzwert** erweitert, ab dem das disruptive Potenzial so hoch ist, dass sich das potenziell disruptive Fahrzeug-

²³ Anthony war unter anderem Co-Autor bei C. M. Christensens Buch „Seeing what’s next“ (2004) und Senior Partner bei Innosight, einer Strategieberatung die Christensen mitgegründet hat [05.04.2022].

²⁴ Nur die Punktzahlen 0, 2 und 4 werden operationalisiert. Liegen Fahrzeugkonzepte dazwischen, werden sie mit 1 respektive 3 bewertet.

konzept unter günstigen Rahmenbedingungen zu einer Disruption entwickeln und den Status quo ersetzen kann. Der Grenzwert wird aus dem Produkt der Anzahl der Kriterien und dem mittleren Erfüllungsgrad, hier 30 bei 15 Kriterien und einer Skala von 0–4, berechnet.

Die Einschätzung des disruptiven Potenzials unterliegt ex-ante hohen Unsicherheiten, weil in der Regel komplexe systemische Zusammenhänge vorliegen. Deshalb wird ein **Erwartungsbereich** der Bewertung über eine Variation der Erfüllungsgrade definiert. Jeder Erfüllungsgrad wird im best case um 0,5 erhöht und im worst case um 0,5 reduziert. Die Grenzen des Intervalls [0,4] werden dabei weder über- noch unterschritten. Daraus ergibt sich die Bandbreite, in der das disruptive Potenzial der Fahrzeugkonzepte voraussichtlich variiert.

Die erarbeitete Vorgehensweise wird in Kapitel 6.2 für die neuartigen Fahrzeugklassen aus Kapitel 2 angewendet.

5 Anwendung des Bewertungsmodells für ausgewählte Fahrzeugkonzepte

Das im vorherigen Kapitel entwickelte Bewertungsmodell wird im Folgenden auf die in Kapitel 2 identifizierten neuartigen Fahrzeugkonzepte angewendet. Dazu wird zunächst eine Referenzanwendung abgeleitet und deren Transportbedarfe ermittelt. Anhand qualitativer Einsatzmöglichkeiten der Fahrzeugkonzepte in der Referenzanwendung wird dann eine erweiterte Nutzenanalyse durchgeführt. Anschließend werden Einsatzszenarien für die Referenzanwendung quantifiziert und Fahrzeugspezifika definiert. Damit liegen alle notwendigen Eingangsdaten für die Detailanalysen zu Kosten (RCO) und Umweltwirkungen (LCA) vor. Die prospektiven Bewertungsansätze zur Technologiereife und zum disruptiven Potenzial werden in Kapitel 6 angewendet.

Die Bewertung erfolgt anhand repräsentativer Vertreter der Fahrzeugklassen (Abbildung 2.3): Die on-the-road integralen Fahrzeugklassen „conventional integral“ (ci), des fahrerlosen Pendants ci*, „flexible mover“ (fm) und „integral mover“ (im) werden durch die generischen Fahrzeuge Van , RoboVan , Flex  und Mover  vertreten. iMod  und U-Shift  repräsentieren die on-the-road modularen Fahrzeugklassen ibm (infrastructure-based modular), respektive sam (standalone modular).

5.1 Synthese der Referenzanwendung S-Vaihingen

Auf Basis des in Tabelle 3.2 entwickelten morphologischen Kastens wird zunächst eine Referenzanwendung abgeleitet und deren Transportbedarf quantifiziert. Anschließend werden mögliche Einsatzszenarien der Fahrzeugkonzeptalternativen diskutiert.

5.1.1 Beschreibung der Referenzanwendung

Gemeinsam mit Vertretern der IHK-Stuttgart und der Stadt Stuttgart wurde der Stuttgarter Stadtteil **S-Vaihingen** als Quartier mit Potenzial für die Einführung neuer Fahrzeugkonzepte im urbanen Wirtschaftsverkehr identifiziert [336, 337]. Bürgerbefragungen der Stadt Stuttgart ergaben den Wunsch nach einer höheren Vielfalt an Einzelhändlern und Gastronomiebetrieben im Stadtteilzentrum S-Vaihingen [338]. Dies führt

potenziell zu verstärktem Lieferverkehr mit kleinteiligeren Sendungen. Gleichzeitig fordert die Bevölkerung des Referenzgebiets eine Aufwertung der Aufenthaltsquartiere durch Verkehrsberuhigung mit Einfahrts- und Zugangsbeschränkungen [338]. Konsolidierte Lieferungen und Nachtzustellungen können geeignete Maßnahmen sein. In S-Vaihingen wachsen zwei Quartiere besonders intensiv: das Gewerbegebiet Synergiepark und das geplante Quartier Eiermann-Campus. Beide Quartiere werden auch im Rahmen der Internationalen Bauausstellung 2027 adressiert [339, 340]. Das Gewerbegebiet wächst voraussichtlich um 18.000 Beschäftigte in 20 Jahren auf 40.000 in 2040 [341]. Dabei sollen Versorgungsmöglichkeiten wie Einzelhandel und Gastronomie sowie Paketstationen ausgebaut werden [342]. Mit Baufertigstellung zwischen 2030 und 2040 soll der Eiermann-Campus als neues Mischquartier Wohnungen für 3.500 Personen und Gewerbeflächen für 1.800 Beschäftigte bereitstellen [343], wodurch substantielle Steigerungen der Liefer- und Personenverkehre zu erwarten sind.

Betrachtete Einsatzbereiche in der Referenzanwendung sind die Personenbeförderung im öffentlichen Nahverkehr, die Citylogistik-Segmente Konsumgüterdistribution/-kontraktlogistik und Stückgutlogistik sowie Paketlieferungen im KEP-Segment. Andere Verkehre werden in allen Einsatzszenarien weiterhin im Status quo durchgeführt.

Für die betrachteten Bereiche ergeben sich für die Referenzanwendung S-Vaihingen verschiedene sinnvolle Ausprägungen basierend auf vielversprechenden Logistik-Konzepten (S. 29 bzw. Tabelle D.1) und dem in Kapitel 3.3 entwickelten morphologischen Kasten (Tabelle 3.2):

- Eine konsolidierte White-Label-Logistik ist ab einem Konsolidierungszentrum (UCC) vorgesehen, wobei Status quo-Logistikunternehmen dieses konsortial führen. Das UCC wird in der Nähe des Autobahnkreuzes Stuttgart und einem bestehenden Gewerbegebiet verortet, sodass Zufahrtswege in das Zustellgebiet minimiert werden.

- Für die Personenbeförderung wird ein Demand Responsive Transit (DRT) System den ÖPNV ergänzen. Eine Kannibalisierung bestehender ÖV-Kapazitäten wird möglichst vermieden.
- Stückgut- und Konsumgüterverkehre zu Einzelhändlern werden je nach Lieferbedarf (Größe der Senke) im Single-Stopp oder mehrere Sendungen konsolidiert im Multi- oder Single-Stopp zugestellt. Beim Multi-Stopp werden mehrere Kunden nacheinander angefahren. Beim konsolidierten Single-Stopp werden räumlich dicht beieinander liegende Kunden ab einem Zustellort beliefert (im Sinne eines Mikrohub). Soweit möglich wird eine Nachtlogistik umgesetzt.
- Im KEP-Bereich sind entweder Paketstationen als Warenübergabestationen, eine Haustürzustellung oder mobile Paketstationen möglich.
- Der konsortial geführte Betreiber des UCC ist auch der für S-Vaihingen beauftragte Transportdienstleister. Er beschafft und betreibt alle Fahrzeuge und Transporteinheiten sowie die erforderlichen Infrastruktur- und Betriebsmittel eigenwirtschaftlich. Das Geschäftsmodell basiert auf dem Transport-as-a-Service-Ansatz, d. h. die Transporte sowie die begleitenden Prozesse werden als Dienstleistung im Auftrag Dritter (Status quo-Akteure) durchgeführt. Es erfordert daher eine enge Kooperation mit Transportunternehmen, die Güter im UCC auf den White-Label-Weitertransport umschlagen, sowie mit ÖPNV-Betreibern für eine effektive Integration des On-Demand-Angebots in bestehende ÖPNV-Strukturen.

Die erarbeitete Referenzanwendung wurde vor Experten aus der Arbeitsgruppe Mobilität der Internationalen Bauausstellung (IBA) 2027 vorgestellt und als plausibel und geeignet erachtet [344, 345], ebenso in einer Diskussion mit dem Beauftragen der IHK Stuttgart für die Citylogistik [336].

Analysen, die auf der Referenzanwendung basieren, unterliegen folgenden **Randbedingungen** und ergänzenden Anmerkungen:

- Es werden nur Personenverkehre innerhalb der Stadtteilgrenzen S-Vaihingens betrachtet.
- Der Zeithorizont der Referenzanwendung wird visionär auf 2040 datiert, sodass knapp 20 Jahre zur Verfügung stehen, die Maßnahmen einzuführen und die neuartigen Fahrzeugkonzepte für die Serienreife zu qualifizieren.
- Es wird unterstellt, dass Kunden die neuen Zustellkonzepte annehmen, obwohl die Zustellung durch Warenübergabestationen, wie Paketstationen, für Kunden weniger komfortabel als die Haustürzustellung ist. Im KEP-Segment ist jedoch eine zunehmende Attraktivität von Paketstationen wahrzunehmen. Auch in der Citylogistik sind Warenübergabestationen bereits im Einsatz (Kapitel 3.2.2).
- Die verkehrlichen Bedarfe sind gegenüber dem Status quo weitestgehend unverändert, wobei Bedarfe der Quartiere Eiermann-Campus und Synergiepark im Personenverkehr und der Paketbelieferung zusätzlich berücksichtigt werden.
- Die Ableitung von Transportbedarfen unterliegt der Annahme, dass die Einführung von fahrerlosen Fahrzeugen keine Änderung der Verkehrsnachfrage bewirkt (in Anlehnung an [114]).
- Die Nachfrage ist konstant, uniform verteilt und unbeeinflusst von externen Einflüssen.

5.1.2 Ermittlung der Transportbedarfe

Entsprechend des in Kapitel 4.1.1 entwickelten Vorgehens wird in den folgenden Abschnitten, der Transportbedarf für die Referenzanwendung S-Vaihingen ermittelt.

Personenbeförderung anhand von Verkehrsmodellen und Modal Shift

Die Untersuchung der Bedarfe in der Personenbeförderung erfolgt anhand von Daten aus mikroskopischen Nachfragemodellen. Für die Referenzanwendung S-Vaihingen werden Daten des Nachfragemodells des Verbands Region Stuttgart (VRS) [159, 346] herangezogen, welches die Nachfrage eines Werktags basierend auf einer Haushaltsbefragung im Jahr 2010 umfassend beinhaltet. Entsprechend der Entwicklung der

Bevölkerung Stuttgarts zwischen 2010 und 2021 werden die Daten skaliert²⁵. Die Quartiere Eiermann-Campus und Synergiepark werden als besonders intensiv wachsende Gebiete zusätzlich anhand der Entwicklung von Beschäftigten angepasst²⁶. Die tägliche Nachfrage an Fahrten wird für die Modi Pkw, Pkw-Mitfahrende, ÖV, Fahrrad und zu Fuß differenziert. Es werden nur Fahrten zwischen Verkehrszellen innerhalb des Referenzgebiets betrachtet, d. h. nur Binnenverkehre in S-Vaihingen.

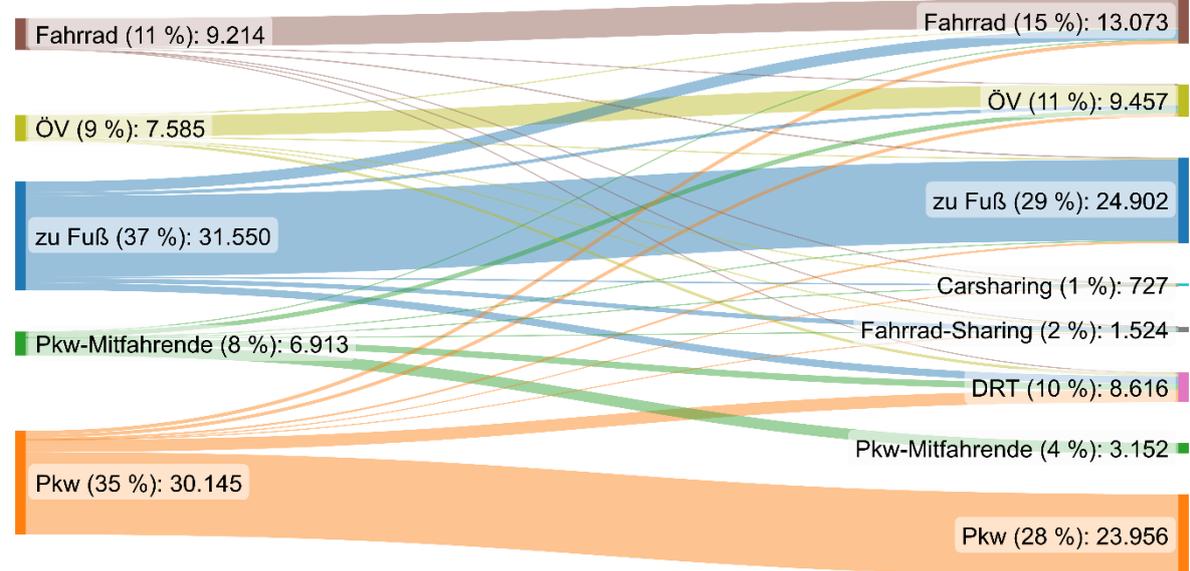
In der Referenzanwendung S-Vaihingen wird der ÖPNV um ein On-Demand Ridepooling System, bzw. **Demand Responsive Transport** (DRT, Kapitel 3.2.1), ergänzt. Der Modal Shift für die Referenzanwendung S-Vaihingen wird aus einer Simulation für Hamburg (Szenario DRT2030) [160] abgeleitet, welche ebenfalls ein DRT-System einführt und den MIV, ÖV sowie nicht motorisierte Modi mit berücksichtigt. In Kombination mit der Datenbasis aus dem skalierten VRS-Nachfragemodell ergeben sich in Abbildung 5.1 die Bedarfe je Modus, der Modal Shift und Modal Split, welcher in einer ähnlichen Größenordnung wie in anderen Studien liegt [155, 160–162].

²⁵ Skalierung mit 107 % basierend auf 565.912 Einwohnern in 2010 und 603.713 in 2021 [347]. Die Wirkung eines sich veränderndes Mobilitätsverhaltens auf die Nachfrage wird durch die Modal-Shift-Analyse in Abbildung 5.1 berücksichtigt.

²⁶ Skalierung für Synergiepark und Eiermann-Campus um 141 %/ 164 %, mit Daten aus [341, 343, 348].

Abbildung 5.1: Bedarfserhebung und Modal Shift im Personenverkehr

Werte für die Binnenverkehre der Referenzanwendung S-Vaihingen als Sankey-Diagramm; links: Status quo; rechts: ermittelte Bedarfe in Fahrten je Tag nach der Einführung von DRT; Modal Split in Klammern; Wechselfaktoren des Modal Shift angepasst anhand des Szenarios DRT2030 für Hamburg²⁷ [160]; adaptiert auf die Datenbasis des Verkehrsmodells für Stuttgart VRS [159, 346]



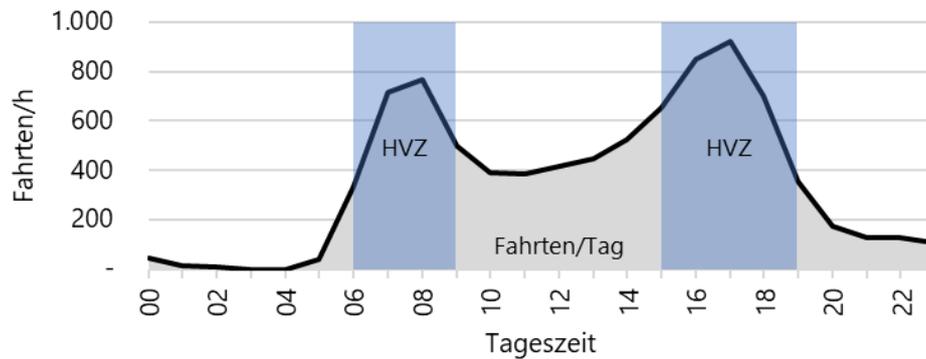
Quelle: Eigene Darstellung unter Verwendung von [350]

Aus dem ermittelten täglichen Bedarf wird mit einer **Tagesganglinie** der Bedarf je Stunde untersucht. Detaillierte Werte für die Tagesganglinie werden aus der Verkehrstatistik des Navigationsanbieters TomTom entnommen [351]. Dabei wird der Mittelwert aus den Werktagen Montag bis Freitag in 2019 berechnet, da sich die VRS-Daten auf einen Werktag beziehen. Der typisch markante Verlauf mit zwei Spitzen morgens und nachmittags deckt sich mit dem anderer Erhebungen und Studien für den ÖPNV [114, 352–355]. Die DRT- Tagesganglinie deckt sich weitestgehend mit der des ÖV und MIV [114, 356]. Abbildung 5.2 stellt die Tagesganglinie des DRT dar.

²⁷ Unter anderem wurde der Modus „ÖV+Shuttle“ den Modi ÖV und DRT zugeordnet, die Wechselfaktoren von X-zu-MIV reduziert, da Verkehrsentwicklungen Rahmenbedingungen schaffen werden, die den ÖV stärken [118, 349], und die starke Fahrradorientierung reduziert.

Abbildung 5.2: Tagesganglinie des DRT in der Referenzanwendung

Das Integral der Tagesganglinie gibt die Fahrten je Tag und damit die durch DRT beförderten Personen je Tag an; HVZ: Hauptverkehrszeit



Quelle: Eigene Darstellung

Für jede Kombination der Verkehrszellen in dem VRS-Verkehrsmodell wird mittels einer GIS-Analyse (Abwandlung des auf S. 96 entwickelten Tools) die mittlere Entfernung der Zellen-Mittelpunkte ermittelt. Damit berechnet sich die mittlere Wegstrecke der Fahrten zwischen und innerhalb der Verkehrszellen in der Referenzanwendung S-Vaihingen zu 2,82 km. Täglich entstehen in der Referenzanwendung ca. 25.000 Personenkilometer im DRT-Segment, ein Drittel davon in den Hauptverkehrszeiten. Die Erhebungsreihe „Mobilität in Städten - SrV 2018“ gibt für die Stadt Böblingen (strukturell ähnlich wie S-Vaihingen) eine durchschnittliche Geschwindigkeit im ÖV von 9,4 km/h an [122]. Da andere Quellen Geschwindigkeiten von 13–30 km/h für Busse und DRT [357, 358] angeben, wird für die Referenzanwendung eine Fahrgeschwindigkeit von 15 km/h definiert. Daraus ergibt sich eine mittlere Dauer von ca. 11 min je Fahrt. Durch Betriebsfahrten und Stoppzeiten reduziert sich die effektive Fahrgeschwindigkeit. Die Haltezeit wird in Anlehnung an den Busbetrieb auf 12 s je Halt festgelegt. Der Wert befindet sich in der unteren Bandbreite gemessener Werte in der Literatur [359–361], da im DRT-Betrieb weniger Personen zeitgleich zu- oder aussteigen. Der Leerkilometeranteil von Linienbussen ist 15 % (Kapitel 3.2.1). In einer Simulation für geteilte autonome Fahrzeuge in Stuttgart fuhren Ridepooling bzw. DRT Fahrzeuge zu 13 % leer, 87 % der Fahrten mit Passagieren [114, S. 25]. Der mittlere Besetzungsgrad von Pkw beträgt 1,36 (Abschnitt 3.2.1), die Auslastung von Linienbussen 18 %. Die Auslastung von DRT-

Systemen beträgt gemäß einer Untersuchung für Stuttgart durchschnittlich 40 % für Fahrzeuge mit 6 Plätzen [114] bzw. 53 % entsprechend einer OECD-Studie für Lissabon [162]. Die OECD Studie untersuchte zudem DRT-Systeme mit Fahrzeugen für 16 Personen. Diese waren in der Simulation zu 70 % ausgelastet [162]. Das durchschnittliche Gewicht von Passagieren wird anhand des Mikrozensus für Deutschland in 2017 mit 77 kg festgelegt [362].

Citylogistik mittels GIS-Analyse und Fallstudien

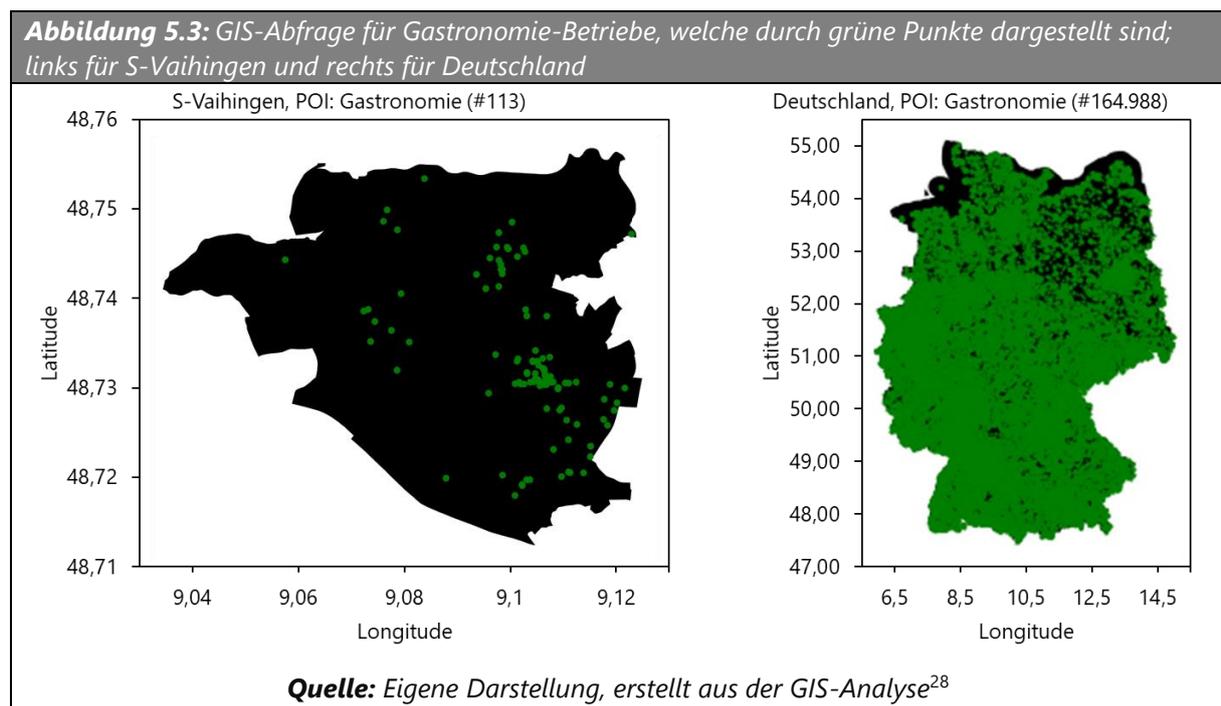
Zur Ermittlung der Güternachfrage werden gemäß Kapitel 4.1.1 statistische Daten mit einer GIS-Analyse verknüpft. Eine umfassende **mikroskopische Datenerhebung der Liefermengen** nach einzelnen Kundentypen liefert eine Fallstudie für Würzburg [166, 363]. Weitere Fallstudien für andere Städte bestätigen deren Ergebnisse weitgehend [12, 140, 167]. Basierend auf den Daten für Würzburg sowie Ergänzungen durch andere Fallstudien, stellt Tabelle D.2 in Anhang D den täglichen Bedarf verschiedener Kundenkategorien in der Citylogistik dar, wobei eine gleichmäßige wöchentliche und saisonale Verteilung angenommen wird.

Für Anlieferungen durch das KEP-Segment („x-to-Business“, x2B) wird ein Paket mit durchschnittlich 0,06 m³ und 5,86 kg als Standardeinheit definiert [6, 140, 166]. Andere Paketformate existieren, werden für die Analyse des Transportbedarfs an dieser Stelle aber vernachlässigt. Die übrigen Gütertransporte werden in dieser Arbeit auf Europaletten bezogen: 1200x800 mm², 0,96 m³ und 112 kg (durchschnittliche Werte aus Wittenbrink et al. (2016) und Müller-Steinfahrt et al. (2018) [140, 166]). Neben dem Empfang von Waren versenden bzw. retournieren Kunden diese: der Retourenfaktor bei x2B-KEP wird nach Wittenbrink et al. (2016) mit 8 % und bei Europaletten mit 85 % angenommen, wobei sich das Gewicht für Retouren bei KEP nicht und bei Sendungen auf Europaletten um ca. 60 % reduziert [140].

Unter Einbeziehung der Stoppzeiten beträgt die Durchschnittsgeschwindigkeit von Status quo-Zustellfahrzeugen 2,6 km/h im Innenstadtgebiet bzw. 4,1 km/h unter

Berücksichtigung der Zubringerwege [140]. Für die Referenzanwendung werden 3 km/h angenommen, da statt einer Innenstadt der Stadttyp Mischgebiet vorherrscht, Zubringerwege durch den Untersuchungsrahmen aber entfallen. Für Gütertransporte abseits des KEP-Segments wird eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 10 km/h inklusive bzw. 20 km/h exklusive Stoppzeiten festgelegt [140].

Für diese Arbeit wird die **GIS-Analyse in Python**²⁸ umgesetzt. Zunächst werden die Attribute der POI aus der OSM-Datengrundlage [163, 165] den Kundenkategorien (Tabelle D.2) zugeordnet. Für die Kategorie Gastronomie werden z. B. folgende POI aggregiert: {'amenity': ['bar', 'biergarten', 'cafe', 'fast_food', 'food_court', 'ice_cream', 'pub', 'restaurant']}. Die Abfrage über das Python-Modell ergibt eine Liste an Koordinaten aller Betriebe der entsprechenden Kategorie in dem Referenzgebiet (beispielhaft in Abbildung 5.3).



²⁸ Für die GIS-Analyse, d. h. die Analyse von räumlichen Daten (Kapitel 4.1.1), werden neben der Python-Standardbibliothek die folgenden Bibliotheken unter Open-Source-Lizenzen (in Klammern) genutzt: Geopandas (BSD), Matplotlib (PSF), NetworkX (BSD), OSMnx (MIT) und Shapely (BSD) [164, 206, 364–367].

Zur Verifizierung des Ansatzes wird das Vorgehen auf Deutschland übertragen: das Python-Modell ergibt 164.988 Betriebe (Abbildung 5.3), das Statistische Bundesamt nennt 170.625 Betriebe für den Wirtschaftszweig WZ08-56 (Gastronomie) im Jahr 2020 [368]. Die Differenz beträgt 3 %, womit das Modell unter Berücksichtigung der teilweise nicht eindeutigen Klassifizierung der POI hinreichend valide Ergebnisse liefert.

Ausgehend von dem Standort eines zentralen Konsolidierungszentrums (UCC) als Ausgangspunkt werden die Fahrstrecken zu den jeweiligen POI ermittelt: Mit der **Routing**-Bibliothek NetworkX wird die kürzeste Distanz entlang des importierten Straßennetzes berechnet (Abbildung 5.4).

Abbildung 5.4: Streckenanalyse zwischen Depot und POI
Beispielhaft für drei POI der Kategorie Gastronomie in der Referenzanwendung S-Vaihingen und dem in Abschnitt 5.1 definierten Konsolidierungszentrum (UCC)

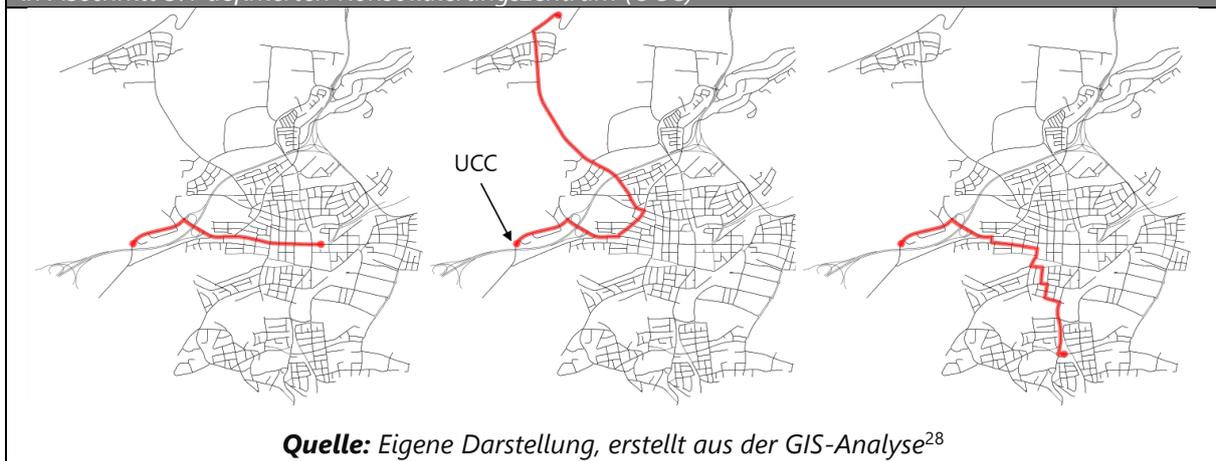


Tabelle 5.1 stellt das **Ergebnis der GIS-Analyse** dar: für jede Kundenkategorie, deren Anzahl im Referenzgebiet sowie die mittlere Entfernung zum Depot. Entlang der Kundenkategorie können Tabelle D.2 und Tabelle 5.1 zu einer Nachfragematrix verknüpft werden. Bei einer durchgängigen Single-Stopp-Belieferung fiel damit eine Gesamtfahrleistung von 1,2 Mio. km p. a. an. Skaliert anhand der durchschnittlichen

Fahrstrecke von Lkw²⁹ gegenüber dem „Last Mile“-Anteil in S-Vaihingen³⁰ sowie zusätzlich anhand der Bevölkerung von Deutschland gegenüber S-Vaihingen³¹, ergibt sich eine Fahrleistung von 51 Mrd. km p. a. des Lkw-Verkehrs in Deutschland. Die offizielle Angabe der Bundesanstalt für Straßenwesen für das Jahr 2020 beträgt 64 Mrd. km [373]. Die Ergebnisse der GIS-Analyse sind damit in derselben Größenordnung.

Tabelle 5.1: Ergebnis der GIS-Analyse: Anzahl der POI und mittlere Distanzen

Anzahl bezieht sich auf die ermittelten POI im Referenzgebiet, Strecke auf die mittlere Distanz zwischen definiertem UCC in der Referenzanwendung S-Vaihingen und den POI; im Referenzgebiet existieren keine POI für Kaufhaus oder Verbrauchermarkt; *Betriebe bzw. Filialketten führen die Transporte in der Regel in Eigenregie mit hoch-kapazitiven Fahrzeugen (N2, N3) durch (Abschnitt 3.2.2)

Kundenkategorie	Anzahl	Strecke (Median) [km]
Dienstleistung	81	2,95
Discounter*	9	2,56
Drogeriebedarf	2	2,62
Fachgeschäft	70	2,52
Gastronomie	113	2,73
Gesundheit	38	2,81
Handwerk (Lebensmittel)	29	2,79
Handwerk (Sonstige)	26	2,88
Krankenhaus/Pflege	7	3,93
Mode	9	2,37
Öffentliche Einrichtung	74	3,67
Sonstiges Gewerbe	103	3,49
Sportgeschäft	3	2,30
Supermarkt*	12	2,74
Unterhaltung	28	2,86
Unterkunft	12	3,21

Quelle: Eigene Zusammenstellung

²⁹ ca. 125 km/Tag/Fahrzeug laut der Statistikreihe Verkehr in Zahlen [369, 370].

³⁰ 2*2,6 km/Tag/Fahrzeug in S-Vaihingen (Mittelwert der Strecken aus Tabelle 5.1)

³¹ 83.237.124 in Deutschland [371], 45.802 in S-Vaihingen [372] (jeweils Stand: 31.12.2021)

Paketlieferung für Privatkunden als Teil der Citylogistik durch Statistik

Für die Paketlieferungen an Privatkunden im KEP-Segment (x2C: B2C und C2C) wird der tägliche Bedarf anhand von statistischen Daten erhoben. Entsprechend des Bundesverbands für KEP-Dienste, BIEK, wurden im deutschen x2C-Bereich 65 Pakete je Haushalt im Jahr 2021 zugestellt [168], wobei die Pakete durchschnittlich 7,46 kg wogen (Tabelle 3.1). Das Referenzgebiet S-Vaihingen gliedert sich in 12 Stadtteile³², welche sich hinsichtlich ihrer Flächennutzung unterscheiden: z. B. überwiegt im Stadtteil 714 die industrielle und gewerbliche Nutzung, während die Flächen in 713 vor allem dem Wohnen gewidmet sind [374]. Daher wird der **Paketbedarf inklusive Retouren** (8 % gemäß Wittenbrink et al. (2016) [140]) je Stadtteil gesondert erhoben.

Neben der herkömmlichen Haustürzustellung finden sich vermehrt andere Zustellkonzepte wie stationäre oder mobile **Paketstationen** (Kapitel 3.2.2). Die Analyse des städtischen Güterverkehrskonzepts für Basel nennt 200 Einwohner je Hektarzelle als Grenzwert, ab dem die Einführung von Paketstationen sinnvoll ist [140]. Für diese Arbeit wird der Grenzwert auf 150 Einwohner/ha reduziert, da sich der Trend zu Zustellungen an Paketstationen seit der Anfertigung der Basel-Studie in 2016 deutlich verstärkt hat [6, 9, S. 17, 109] und im internationalen Vergleich bereits weiter verbreitet ist [377]. In S-Vaihingen erfüllen 6 Stadtteile diese Bedingung.

Tabelle 5.2 stellt das Ergebnis der Analyse dar.

³² Stadtteile des Stadtbezirks S-Vaihingen: 711 Vaihingen-Mitte, 712 Österfeld, 713 Höhenrand, 714 Wallgraben-West, 715 Rosental, 716 Heerstraße, 717 Lauchäcker/Lauchhau, 717a Lauchäcker, 717b Lauchhau, 718 Dachswald, 719 Pfaffenwald, 721 Büsnau, 731 Rohr, 741 Dürrolewang [374]; Stadtteil 717 wird aufgrund einer heterogener Verteilung der Einwohner aufgeteilt [375, 376]; Erweiterung des Stadtteils 715 um geplantes Quartier EMC Eiermann-Campus [343].

Tabelle 5.2: Paketbedarf von Privatkunden und Verteilung von Paketstationen im (x2C) KEP-Segment der Referenzanwendung S-Vaihingen

Haushalte mit durchschnittlich je 1,86 Personen [378]; Pakete je Tag bei 303 Werktagen p. a.; WBF: Wohnbaufläche; Paketstationen ab 150 Einwohnern je Hektarzelle; PS: Paketstation; Berechnung basierend auf Einzugsgebiet³⁴ (0,21 km²) von Paketstationen mit 76 Fächern (Abbildung G.3); Distanz: durchschnittliche Distanz eines möglichen Konsolidierungszentrums (Abschnitt 3.3) zum Mittelpunkt des Stadtteils

Stadtteil ³²	Haus-halte	Pakete/Tag	Retouren/Tag	WBF [km ²]	Einwoh-ner/ ha	PS bzgl. Fläche	PS bzgl. Bedarf	Distanz [km]
711	3638	780	62	0,43	157	3	12	2,70
712	759	163	13	0,15	91	-	-	3,70
713	1200	257	21	0,25	88	-	-	4,00
714	439	94	8	0,04	194	1	2	3,70
715	1923	413	33	0,38	95	-	-	2,60
EMC	1685	361	29	0,20	161	1	6	1,10
716	2747	589	47	0,50	102	-	-	2,20
717	1614	346	28	0,33	90	-	-	3,20
717a	980	210	17	0,29	63	-	-	3,20
717b	635	136	11	0,04	274	1	2	3,20
718	2525	542	43	0,50	94	-	-	3,20
719	2001	429	34	0,10	369	1	7	3,70
721	1415	304	24	0,22	122	-	-	4,80
731	4245	911	73	0,81	98	-	-	3,90
741	2126	456	36	0,25	160	2	7	5,10

Quelle: Eigene Zusammenstellung mit Daten von [140, 168, 374–376, 378]

Für die **räumliche Verteilung möglicher Paketstationen** im Referenzgebiet wird zunächst die Bevölkerungsdichte³³ in der Referenzanwendung auf Stadtteil-Ebene berechnet: Tabelle 5.2. Anschließend wird der Bedarf an Paketstationen nach

³³ Die Bevölkerungsdichte wird typischerweise auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche bezogen, welche neben Wohnflächen auch Flächen für Industrie- und Gewerbe beinhaltet [374]. Für die räumliche Verteilung der Paketanlieferung an Privathaushalte scheint die Bevölkerung je Wohnbaufläche von höherer Relevanz [372, 374].

Einzugsgebiet³⁴ und Nachfragemenge bestimmt (Tabelle 5.2). Das Maximum beider Kennwerte gibt die Anzahl der Paketstation-Standorte an, welche für den jeweiligen Stadtteil benötigt werden.

Für die Bestimmung der Paketstationen je Nachfragemenge ist die **Anzahl der Pakete je Paketstation** erforderlich. Dazu wurden zunächst 10 reale Paketstationen der DHL-Gruppe aufgesucht und ermittelt, wie viele Fächer unterschiedlicher Größe typisch sind: durchschnittlich 35 % S-, 45 % M-, 15 % L- und 5 % XL-Fächer. Auf Grundlage dessen sowie des Produkts „KePol Flex“³⁵ wird eine mögliche Paketstation (2600x1340x1930 mm³) mit 28 S-, 34 M-, 12 L- und 2 XL-Fächern für diese Arbeit konzipiert: Abbildung G.3. in Anhang G.

Aggregierte Nachfragemengen in S-Vaihingen

Die Nachfrageermittlung der verschiedenen Bereiche ergibt einen aggregierten Gesamtbedarf für die Referenzanwendung S-Vaihingen:

- Personenbeförderung (DRT; ab S. 91): 8.616 Fahrten á 2,82 km, entsprechend Abbildung 5.2 über den Tag verteilt
- Citylogistik (x2B; ab S. 95): 595 Betriebe mit insgesamt 752 Paketen und 440 Paletten je Tag (gewichtetes Mittel: 3,02 km, 1,26 Pakete, 0,74 Paletten je Ziel)

³⁴ Das Einzugsgebiet einer Paketstation wird in Anlehnung an Literaturannahmen durch eine Kreisfläche mit 300 m Radius (0,28 km²) definiert [140, 379]. Das mathematische Optimierungsproblem der Packung von möglichst vielen gleichen Kreisen in umgebende Geometrien wird in Szabó et al. (2007) behandelt [380]. Die Differenz aus Summe der Kreisflächen und umgebender Fläche wird dabei minimiert. Dennoch verbleibt Verschnitt, d. h. unbedeckte Restfläche der umgebenden Geometrie. Das Problem wird auf die Verteilung der Paketstationen (Kreise) in Stadtteilen (umgebende Geometrie) angewandt. Für jeweils 1–20 Kreise in 6 verschiedenen Geometrien wird der Verschnitt aus Specht (2022) ermittelt [381]: durchschnittlich 27,05 %. Das Einzugsgebiet der Paketstationen wird um diesen Faktor auf 0,21 km² reduziert.

³⁵ Eine Paketstation wird aus mehreren „KePol Flex“-Modulen zusammengesetzt. Die Module werden von dem Hersteller KEBA gefertigt, der Paketstationen z. B. für die DHL Gruppe liefert. Die Paketstation besitzt kein Bedienterminal, sondern wird mittels Smartphone bedient. Dadurch reduziert sich der Energiebedarf der Paketstation und ein Betrieb ausschließlich mit Photovoltaik wird möglich (z. B. „KePol FS eco“ (KEBA) [382, 383].

- KEP (x2C-Paketsegment; ab S 99): 6 Verkehrszellen mit insgesamt 2.256 Paketen je Tag für 19.567 Einwohnerinnen und Einwohner

In der Personenbeförderung wird nur das Segment des Demand Responsive Transport (DRT) für die vergleichende Bewertung der Fahrzeugkonzepte herangezogen. Die anderen Modi werden im Status quo durchgeführt. In der Citylogistik werden die Bedarfe des Einzelhandels berücksichtigt, exklusive Discounter, Kaufhäuser, Supermärkte und Verbrauchermärkte, welche die Transportvorgänge in der Regel in Eigenregie mit hochkapazitiven Transportmitteln (N2, N3) durchführen: Abschnitt 3.2.2. Die sechs Verkehrszellen S-Vaihingens mit der höchsten KEP-Nachfragedichte können vollständig mit Paketstationen beliefert werden. Dieser Transportbedarf wird zusätzlich zu den Transportbedarfen in DRT und Citylogistik in die vergleichende Bewertung aufgenommen.

5.1.3 Einsatzmöglichkeiten der Fahrzeugkonzepte

Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten beschrieben, wie die Vertreter der in Kapitel 2.3 identifizierten Fahrzeugklassen (Van, RoboVan, Flex, Mover, iMod, U-Shift) für die Einsatzzwecke der Referenzanwendung eingesetzt werden können. Die Einsatzmöglichkeiten sind Ausprägungen des in Tabelle 3.2 entwickelten morphologischen Kastens.

Die qualitativen Einsatzszenarien unterscheiden sich für die Anwendung im öffentlichen **Personentransport** kaum: Alle Fahrzeugkonzepte können den ÖPNV z. B. als On-Demand-Shuttle oder im Linienbetrieb unterstützen. Somit ist mit allen Alternativen auch ein Einsatz im vorgesehenen DRT-Betrieb der Referenzanwendung möglich.

Die Nutzung der Fahrzeugkonzeptalternativen in den Branchen **Paketdienste und Einzelhandel** unterscheidet sich hingegen: Bei fahrerlosen Fahrzeugkonzepten fehlt das Fahrpersonal für die Zustellung bis zur Haustür, so dass die Kundinnen und Kunden die Ware selbst von der Transporteinheit abholen müssen (Pick-up). Eine Einsatzmöglichkeit ist in diesem Fall die Nutzung der Fahrzeuge als Warenübergabestationen. Alle Fahrzeugkonzepte können als mobile Warenübergabestationen eingesetzt werden,

wobei die Kundinnen und Kunden die Ware z. B. am Straßenrand in definierten Zeitfenstern abholen. On-the-road modulare Fahrzeugkonzepte können darüber hinaus Transporteinheiten absetzen, die damit quasi-stationäre Warenübergabestationen sind. Im KEP-Segment entspricht dieser Betrieb konventionellen Paketstationen. Bei Flex-Fahrzeugen sind abgekoppelte Einheiten ebenfalls als quasi-stationäre Warenübergabestationen möglich. Alternativ können die Fahrzeugkonzepte als mobile oder quasi-stationäre Mikrohub eingesetzt werden, von denen aus das Zustellpersonal die Waren auf der allerletzten Meile bis zur „Haustür“ ausliefert. In der Einzelhandelsbelieferung kann der konventionelle Multi-Stopp-Betrieb von allen Fahrzeugkonzeptalternativen durchgeführt werden, wobei bei fahrerlosen Konzepten das Einzelhandelspersonal die Be- und Entladevorgänge übernehmen muss. Alternativ können Flex- und on-the-road modulare Fahrzeugkonzepte Einheiten im Single-Stopp-Betrieb bei den Einzelhändlern abstellen.

5.2 Erweiterte Nutzenanalyse

Die in Kapitel 2 abgeleiteten unterschiedlichen Fahrzeugklassen (on-the-road integral: Van, RoboVan, Flex, Mover; on-the-road modular: iMod, U-Shift) werden mit dem in Kapitel 4.1 erarbeiteten Nutzenmodell vergleichend bewertet.

5.2.1 Paarvergleiche entsprechend der AHP-Methode

Basierend auf den Vertretern der Fahrzeugklassen und deren möglichen Einsatzszenarien (Kapitel 5.1.3) werden diese paarweise für die einzelnen Nutzenkriterien (Abbildung 4.3, bzw. Tabelle F.1 in Anhang F) technisch-objektiv verglichen. Der Paarvergleich erfolgt anhand der in Tabelle 4.1 operationalisierten Skalenwerte. Das Ergebnis der 765 Paarvergleiche, die Erfüllungsgrade der Fahrzeugkonzepte je Kriterium, wird in Tabelle F.3 dargestellt, während die Begründungen für die Paarvergleiche in Tabelle F.2 aufgeführt sind. Die Berechnungsgrundlage wurde in Kapitel 4.2.4 formalisiert. Anhand von Beispielen wird die Anwendung des Modells in den folgenden Abschnitten verdeutlicht, während das Ergebnis für die übrigen Nutzenkriterien in Anhang F dargestellt ist.

Fahrzeuge sind **flexibel bezüglich Menge und Art**, wenn sie sich bedarfsorientiert an verschiedene Güterarten und Kapazitätsanforderungen anpassen können. Die Paarvergleiche des Nutzenkriteriums sind in Tabelle 5.3 aufgeführt, ergänzt um die daraus resultierenden Erfüllungsgrade der Fahrzeugkonzepte: U-Shift und iMod als Vertreter der modularen Fahrzeugklassen sind dabei höher bewertet als die integralen Fahrzeugkonzepte. Der Konsistenzfaktor liegt mit 0,05 unter dem Grenzwert nach Saaty (1980) von 0,1 [202], womit die getroffenen Vergleiche konsistent sind.

Tabelle 5.3: Präferenzmatrix „Flexibilität bezüglich Menge & Art (Gütertransport)“ (N01)
 Konsistenzfaktor: 0,05; Van (otri-ci), RoboVan (otri-ci*), Flex (otri-fm), Mover (otri-im), iMod (otrm-sam), U-Shift (otrm-sam); der Erfüllungsgrad ergibt sich entsprechend Kapitel 4.2.4 aus den Paarvergleichen als Eigenvektor der Präferenzmatrix (S. 50); Werte sind gerundet (Tabelle F.3)

Fahrzeugkonzept	Van	RoboVan	Flex	Mover	iMod	U-Shift	Erfüllungsgrad
Van 	1,00	1,00	0,33	1,00	0,20	0,20	0,05
RoboVan 	1,00	1,00	0,33	1,00	0,20	0,20	0,05
Flex 	3,00	3,00	1,00	5,00	0,20	0,20	0,15
Mover 	1,00	1,00	0,20	1,00	0,20	0,20	0,05
iMod 	5,00	5,00	5,00	5,00	1,00	1,00	0,35
U-Shift 	5,00	5,00	5,00	5,00	1,00	1,00	0,35

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Van und RoboVan unterscheiden sich vor allem hinsichtlich des Automatisierungsgrads und erfüllen dieses Nutzenkriterium daher gleichermaßen. Flex kann verschiedene Einheiten koppeln und dadurch die Kapazität des Platoons verändern sowie unterschiedliche Güterarten transportieren. Mover sind nach Verlassen der Produktion an einen Haupt-Einsatzzweck gebunden und können ebenso wie Van und RoboVan nur wenig verschiedene Güterarten aufnehmen und die Kapazität nicht ändern. Durch on-the-road modulare Fahrzeugkonzepte (U-Shift und iMod) können verschiedene Transporteinheiten in verschiedener Größe und für verschiedene Einsatzzwecke von den Fahreinheiten aufgenommen werden. Damit sind otrm Fahrzeuge bei diesem Kriterium auch flexibler als die on-the-road integralen Flex-Fahrzeuge.

Die relative Präferenz der Fahrzeugkonzepte für das Kriterium **Silent Night Delivery** ist in Tabelle 5.4 aufgeführt: Durch die Modularität können U-Shift und iMod Transporteinheiten nachts leise abstellen und die Güter erst am nächsten Morgen ausgeladen werden. Dadurch werden Geräusche beim Ausladen der Güter [384] in der Nacht vermieden. Einzelne Einheiten bei Flex können abgekoppelt werden und am Zielort verbleiben, wobei nicht nur die Transport- sondern auch die Fahreinheit dann untätig ist. Die übrigen Fahrzeugkonzepte unterscheiden sich dahingehend nicht: alle bedingen das Ausladen der Güter aus dem Fahrzeug, bevor dieses weiter eingesetzt werden kann.

Tabelle 5.4: Präferenzmatrix „Silent Night Delivery“ (N39)
 Konsistenzfaktor: 0,01; Van (otri-ci), RoboVan (otri-ci*), Flex (otri-fm), Mover (otri-im), iMod (otrm-sam), U-Shift (otrm-sam); der Erfüllungsgrad ergibt sich entsprechend Kapitel 4.2.4 aus den Paarvergleichen als Eigenvektor der Präferenzmatrix (S. 50); Werte sind gerundet (Tabelle F.3)

Fahrzeugkonzept	Van	RoboVan	Flex	Mover	iMod	U-Shift	Erfüllungsgrad
Van 	1,00	1,00	0,50	1,00	0,50	0,50	0,11
RoboVan 	1,00	1,00	0,50	1,00	0,50	0,50	0,11
Flex 	2,00	2,00	1,00	2,00	0,50	0,50	0,18
Mover 	1,00	1,00	0,50	1,00	0,50	0,50	0,11
iMod 	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	1,00	0,25
U-Shift 	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	1,00	0,25

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Langjährige fahrzeugtechnische Entwicklung hat die **Crash-Sicherheit** der Status quo-Fahrzeuge optimiert: Van und damit auch RoboVan. Bei den anderen Fahrzeugklassen ergeben sich dagegen neue Herausforderungen beim Insassenschutz, da die Fahrzeuge vorwärts wie rückwärts betrieben werden können und neue Lösungen für das Innenraum-/ Sicherheitskonzept notwendig werden. Die einzelnen Module des Flex verhalten sich wie Einheiten des Mover; bei einem Unfall mit aktiver physischer Kopplung besteht jedoch eine erhöhte Unfallgefahr für die Flex-Module. Bei U-Shift und iMod stellt die Schnittstelle zwischen Fahr- und Transporteinheit eine weitere

konzeptbedingte Herausforderung für den Insassenschutz dar. Entsprechend ergibt sich die Präferenzmatrix in Tabelle 5.5.

Tabelle 5.5: Präferenzmatrix „Crash-Sicherheit“ (N14) Konsistenzfaktor: 0,01; Van (otri-ci), RoboVan (otri-ci*), Flex (otri-fm), Mover (otri-im), iMod (otrm-sam), U-Shift (otrm-sam); der Erfüllungsgrad ergibt sich entsprechend Kapitel 4.2.4 aus den Paarvergleichen als Eigenvektor der Präferenzmatrix (S. 50); Werte sind gerundet (Tabelle F.3)								
Fahrzeugkonzept		Van	RoboVan	Flex	Mover	iMod	U-Shift	Erfüllungsgrad
Van 		1,00	1,00	5,00	3,00	5,00	5,00	0,33
RoboVan 		1,00	1,00	5,00	3,00	5,00	5,00	0,33
Flex 		0,20	0,20	1,00	0,33	1,00	1,00	0,06
Mover 		0,33	0,33	3,00	1,00	3,00	3,00	0,15
iMod 		0,20	0,20	1,00	0,33	1,00	1,00	0,06
U-Shift 		0,20	0,20	1,00	0,33	1,00	1,00	0,06

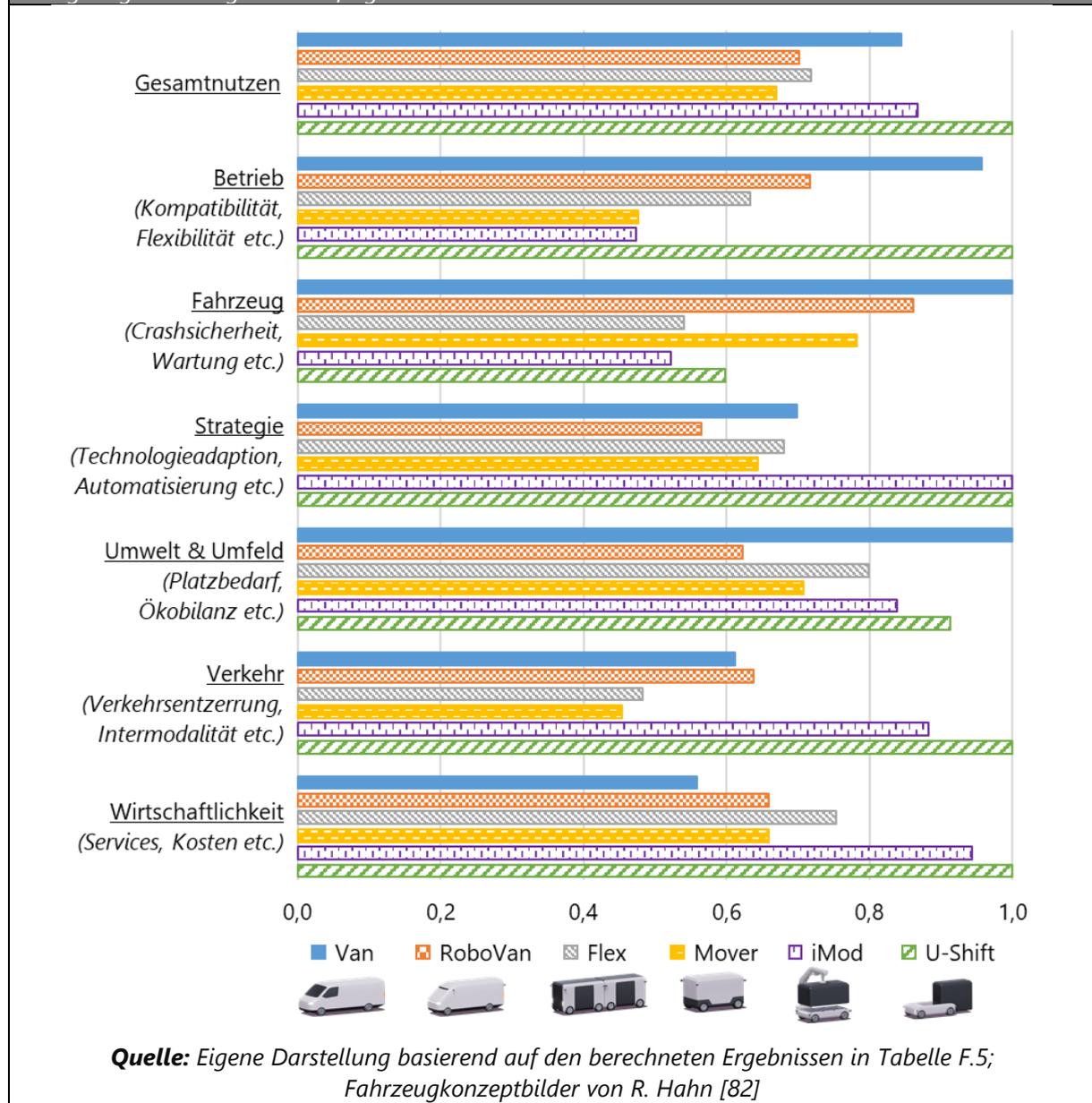
Quelle: Eigene Zusammenstellung

5.2.2 Ergebnisse des erweiterten Nutzenmodells

Das Ergebnis der Nutzenanalyse ist in Abbildung 5.5 für die Nutzenkategorien und den Gesamtnutzen dargestellt sowie zudem im Anhang in Tabelle F.4 (Einzelnutzwerte) und Tabelle F.5 (Kategoriennutzwerte und Gesamtnutzen) aufgeführt. Der Gesamtnutzen ergibt sich entsprechend Formel (4.6) aus dem Produkt der Werte für die Nutzenkategorien und den Gewichtungen der Kategorien aus der Online-Befragung (Kapitel 4.2.3).

Abbildung 5.5: Ergebnisse für die Nutzenkategorien und den Gesamtnutzen

Grundlage der Berechnung sind die Einzelnutzwerte als Produkt von Erfüllungsgrad und Expertengewichtung; der Gesamtnutzen wird gemäß Formel (4.6) als Summenprodukt aus Kategoriennutzwerte und Kategoriegewichtungen der Befragten berechnet



Das on-the-road modulare Fahrzeugkonzept U-Shift erreicht für die betrachteten Nutzenkriterien im Einsatz des urbanen Wirtschaftsverkehrs den höchsten **Gesamtnutzen**, während iMod und der Status quo (Van) mit ähnlichen Ergebnissen die zweit- bzw. dritthöchsten Gesamtnutzen erzielen.

Eine Analyse der Kategorie- und Einzelnutzwerte erlaubt eine vertiefende Interpretation der Ergebnisse.

In der **Kategorie Betrieb** hat U-Shift den höchsten Nutzwert, direkt gefolgt von Van. Die Einzelkriterien in Anhang F zeigen, dass Van und RoboVan in den meisten Nutzenkriterien dieser Kategorie dieselben Nutzwerte haben, da sie sich vor allem im Automatisierungsgrad unterscheiden. Bei Infrastrukturanpassung und Pick-up Entfernung (Kapitel 5.2.1) erreicht Van als Status quo die höchsten Nutzwerte. Beim zeitlich flexiblen Zugang ist der RoboVan vorteilhafter als der Van und U-Shift am vorteilhaftesten. Auch in den Nutzenkriterien Standortflexibilität und variable Haltestellen erreicht U-Shift gegenüber den übrigen Fahrzeugkonzepten einen höheren Nutzwert, da es durch die flexible Anpassung der Zugangshöhe auch ebenerdig barrierefrei ist und Transporteinheiten ohne standortabhängige Infrastruktur wechseln kann.

In der **Kategorie Fahrzeug** haben vor allem die integralen Fahrzeugkonzepte hohe Nutzwerte, da sie bei den als sehr relevant gewichteten Nutzenkriterien zu Sicherheit höhere Nutzwerte erreichen (Kapitel 5.2.1). Zudem ist der Van, der gefolgt vom RoboVan den höchsten Kategorienutzwert erzielt, hinsichtlich Fahreigenschaften durch langjährige Entwicklungsarbeit optimiert und damit in einigen Kriterien überlegen. Bei Reichweite und Ladezeit sind die on-the-road modularen Fahrzeugklassen (U-Shift und iMod) vorteilhaft, da sie verteilte Batterien in den Transporteinheiten als Range Extender nutzen. Die Nutzenkriterien Umrüstdauer, -dependenz und -komplexität, die mit der Art der Modularisierung zusammenhängen, sind bei den integralen Fahrzeugklassen konzeptbedingt besser erfüllt als bei den modularen Fahrzeugkonzepten.

Die beiden Nutzenkriterien Technologieverfügbarkeit und Automatisierungsgrad der **Kategorie Strategie** verhalten sich gegenläufig, da die prospektive Technologieverfügbarkeit des fahrerlosen Fahrens den kritischen Technologiepfad der Fahrzeugkonzepte (Ausnahme: Van) darstellt. Dies hat die Online-Umfrage (Kapitel 4.2.3) ergeben, bei der die Befragten mehrheitlich (13 von 16) das fahrerlose Fahren als den technologischen Pfad bestätigten, der die Einführung der neuartigen Fahrzeugkonzepte am

stärksten verzögert³⁶. Bei der Technologieadaption erreichen iMod und U-Shift hohe Nutzwerte durch die Möglichkeit, neue technologische Entwicklungen durch die Modularität frühzeitig in Betrieb zu nehmen, ohne dafür das gesamte Fahrzeug auswechseln zu müssen; dies trifft in geringerem Maß auch auf Flex zu. Insgesamt ist der Kategorienutzwert für iMod und U-Shift am höchsten. RoboVan erreicht einen etwas geringeren Kategorienutzwert als Van, da Van beim Kriterium „Technologieverfügbarkeit“ im direkten Vergleich zu allen anderen (fahrerlosen) Fahrzeugkonzepten eine höhere Wertung erreicht und damit gemäß AHP-Methodik (Kapitel 4.2.4) einen hohen Erfüllungsgrad erreicht. Dieser liegt über dem von RoboVan beim „Automatisierungsgrad“, während RoboVan und Van bei den anderen beiden Kriterien gleich bewertet sind.

Der Nutzwert der **Kategorie Umwelt & Umfeld** wird maßgeblich durch das in der Online-Befragung (Kapitel 4.2.3) hoch gewichtete Kriterium „Ökobilanz“ beeinflusst, welches detailliert in Kapitel 5.6 untersucht wird. Für die Nutzenanalyse wird davon ausgegangen, dass automatisierte Fahrzeuge aufgrund eines höheren Einsatzes von Energie und Material höhere Umweltwirkungen verursachen als Van-Fahrzeuge (das Fahrpersonal wird in der Ökobilanz nicht berücksichtigt). Daher hat RoboVan einen geringeren Kategorienutzwert als Van, obwohl RoboVan in der Mehrheit der Kriterien denselben Nutzen hat wie Van. Im Vergleich zu den anderen Fahrzeugalternativen liegen die Wertungen für Van und RoboVan jeweils im unteren Bereich, wie in den Paarvergleichen in Kapitel 5.2.1 bzw. Anhang F ermittelt wurde. Dadurch wird RoboVan in dieser Kategorie am niedrigsten bewertet. Entsprechend Abschnitt 5.2.1 sind U-Shift und iMod für eine leise Belieferung während der Nacht besonders geeignet. In der Summe hat Van den höchsten Kategorienutzwert, gefolgt von U-Shift und iMod.

³⁶ Die Ergebnisse der Online-Umfrage zum kritischen Technologiepfad sowie die Ermittlung der prospektiven Technologieverfügbarkeit fahrerlosen Fahrens wird in den Kapiteln 4.5 und 6.1 detailliert beschrieben.

Die Fahrzeugkonzepte U-Shift und iMod sind in der **Kategorie Verkehr** bei den Kriterien Intermodalität (Transporteinheiten auch auf anderen Verkehrsträgern) und Verkehrsentserrung (Verlagerung von Fahrten in Randzeiten) vorteilhaft. Die Flottengröße erhöht sich bei on-the-road modularen Konzepten, da mehr Transporteinheiten erforderlich sind als bei den integralen Alternativen, obwohl weniger Fahreinheiten benötigt werden (Detailuntersuchung in Kapitel 5.3). Die Anzahl der Warenumschnläge erhöht sich voraussichtlich, wenn Konsolidierungszentren, Mikrohubbs und Warenübergabestellen eingesetzt werden. Damit ergibt sich die Präferenzrelation der Kategorie in Abbildung 5.5.

Die **Kategorie Wirtschaftlichkeit** umfasst neben Kostenkriterien auch Kriterien zu Erlösen, Einsatzbereich und ergänzenden Services. Bei den Kosten werden alle fahrerlosen Konzepte gleich bewertet, wobei deren Nutzwert höher als bei Van liegt, da bei diesem kostenintensives Fahrpersonal erforderlich ist. Eine umfangliche Kostenanalyse wird in Kapitel 5.5 durchgeführt. Beim Primärerlös ist Van gegenüber den fahrerlosen Fahrzeugkonzepten vorteilhaft unter der Annahme, dass Kundinnen und Kunden weniger für den Primärtransport bezahlen, wenn komfortable Zustellkonzepte wie eine Haustürzustellung entfallen. RoboVan unterscheidet sich in den Kriterien Kosten, Personal und Primärerlös von Van, während beide in den anderen Kriterien gleich bewertet werden. Die on-the-road modularen Fahrzeugkonzepte sind im Nutzenkriterium Einsatzbereiche vorteilhaft gegenüber den übrigen Konzepten, da sie durch den flexiblen Wechsel anwendungsoptimierter Transporteinheiten für verschiedene Zwecke eingesetzt werden können. Letzteres trifft auch auf Flex zu, wobei hier verschiedene anwendungsspezifische Fahreinheiten zu einem Platoon gekoppelt werden. Flex erreicht damit den dritthöchsten Kategorienutzwert nach U-Shift und iMod.

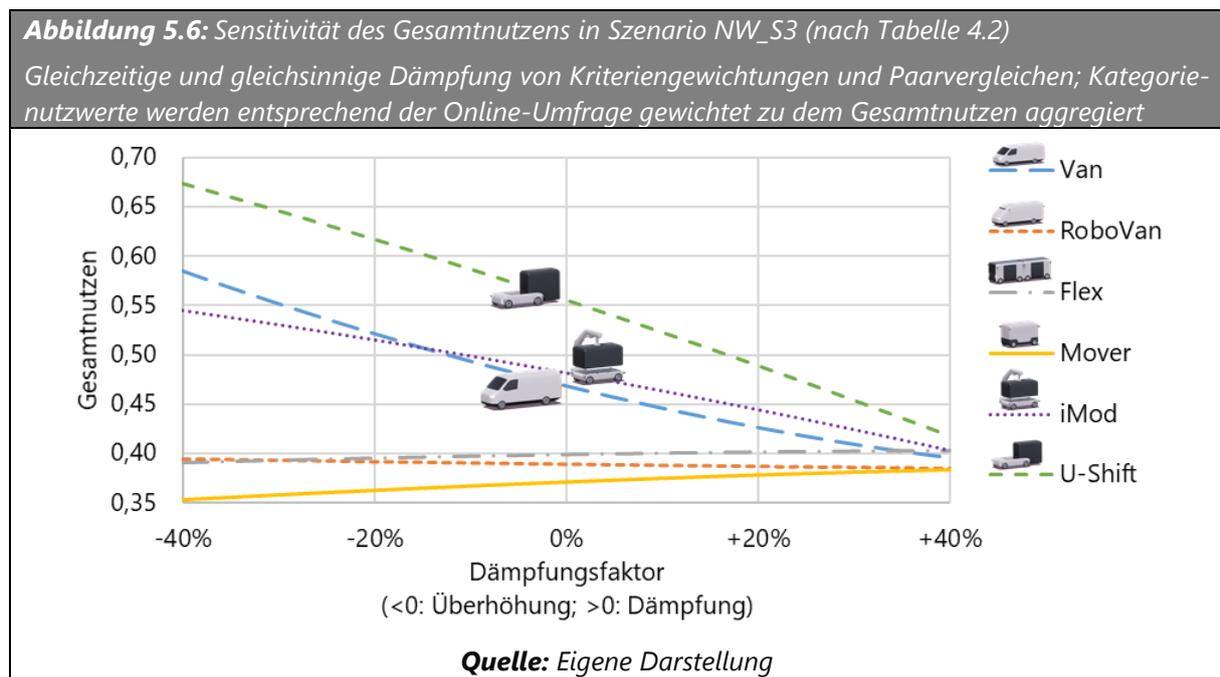
In der Online-Befragung (Kapitel 4.2.3) wurden die Nutzenkategorien Umwelt & Umfeld, Wirtschaftlichkeit und Strategie am höchsten gewichtet (Abbildung 4.4). Dies ist der Grund dafür, dass die Fahrzeugkonzepte im Gesamtnutzen eine andere Rangfolge haben als im Durchschnitt der einzelnen Kategorien. Z. B. liegt das RoboVan-Konzept

in der aggregierten Gesamtwertung aufgrund geringer Wertungen in den Kategorien Strategie sowie Umwelt & Umfeld auf einem niedrigen Rang, obwohl es in den anderen Kategorien mittlere bis vordere Platzierungen erreicht.

5.2.3 Sensitivitätsanalyse über Dämpfungsfaktoren

Die Ergebnisse des erweiterten Nutzenmodells werden entsprechend des methodischen Vorgehens in Abschnitt 4.2.4 auf Sensitivität überprüft. Dazu werden die Kriteriengewichtungen (Ergebnisse aus der Online-Umfrage) sowie die Ergebnisse der Paarvergleiche um 40 % überhöht bzw. gedämpft. Es werden verschiedene Szenarien der Sensitivitätsuntersuchung (NW_S) nach Tabelle 4.2 durchgeführt.

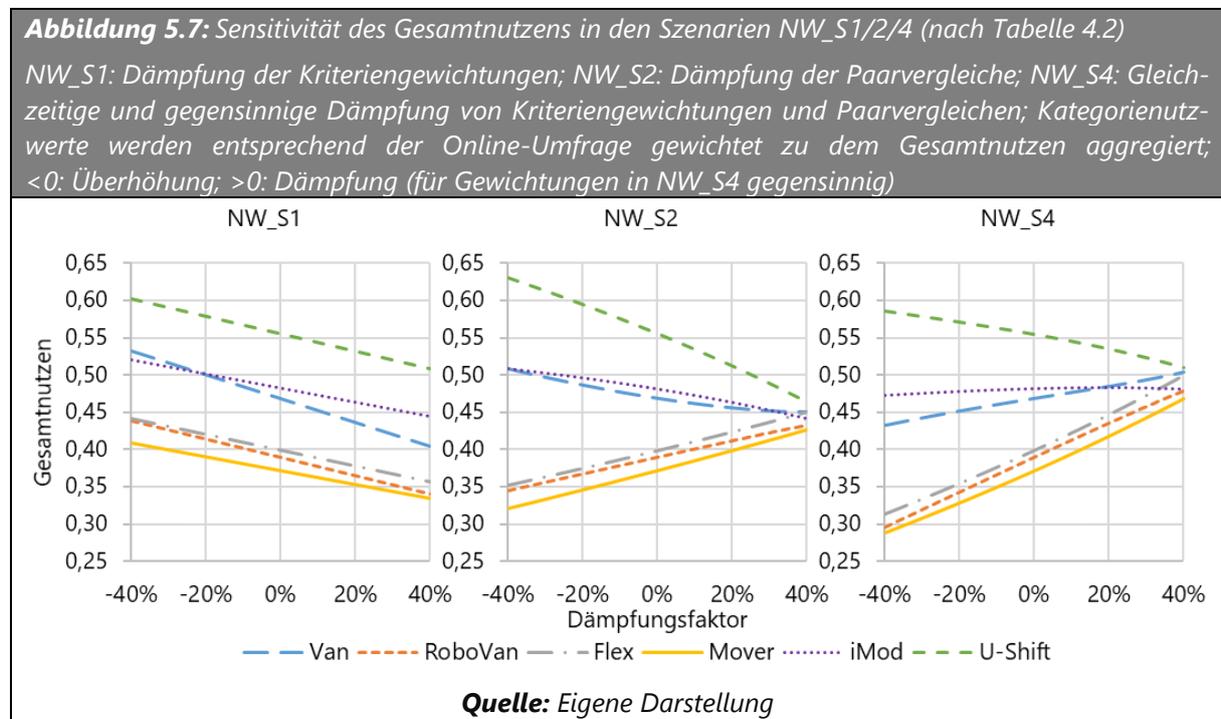
Abbildung 5.6 stellt die Ergebnisse des **Sensitivitätsszenario NW_S3** dar: Die Gewichtungen und die Paarvergleiche werden gleichzeitig gleichsinnig überhöht oder gedämpft und die Auswirkung auf den gewichteten Gesamtnutzen untersucht.



Das Fahrzeugkonzept U-Shift besitzt den höchsten Gesamtnutzen im Basisszenario (0 % Dämpfung; Abbildung 5.5) sowie für das Spektrum der betrachteten Dämpfungsfaktoren. iMod und Van folgen mit ähnlichen Wertungen, welche sich bei einer Überhöhung zugunsten der Van-Fahrzeuge spreizen. RoboVan, Flex und Mover reagieren

weniger sensitiv auf eine Dämpfung oder Überhöhung der Kriteriengewichtungen und Paarvergleiche.

Die übrigen Szenarien der Sensitivitätsanalyse sind in Abbildung 5.7 dargestellt.



Eine Variation der Kriteriengewichtungen verändert das Ergebnis kaum (NW_S1). Eine Überhöhung der Paarvergleiche bewirkt eine Spreizung der Ergebnisse, während sich die Werte bei einer Dämpfung annähern (NW_S2). Bei einer gleichzeitigen Variation der Gewichtungen und Paarvergleiche dominieren die Effekte geänderter Paarvergleiche (NW_S3 und NW_S4) und zeigen damit ähnliche Resultate wie NW_S2.

5.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch die methodische Einbeziehung von Expertinnen und Experten in die Validierung und Gewichtung der Nutzenkriterien sowie die Anwendung des analytischen Hierarchieprozesses (Paarvergleiche) zur Ermittlung der Erfüllungsgrade der Fahrzeugkonzeptalternativen werden die Ergebnisse des erweiterten Nutzenmodells für neuartige Fahrzeugkonzepte abgesichert. Anhand von insgesamt 51 Nutzenkriterien wurden die Nutzwerte für sechs Kategorien berechnet und daraus ein Gesamtnutzen aggregiert.

U-Shift als Vertreter der on-the-road standalone modularen Fahrzeugklasse (otrm-sam), erreicht den höchsten Gesamtnutzen über eine große Bandbreite der Variation von Kriteriengewichtungen und Paarvergleichen, gefolgt von iMod (otrm-ibm) und Van. Flex, RoboVan und Mover haben nahezu identische, geringere Gesamtnutzen.

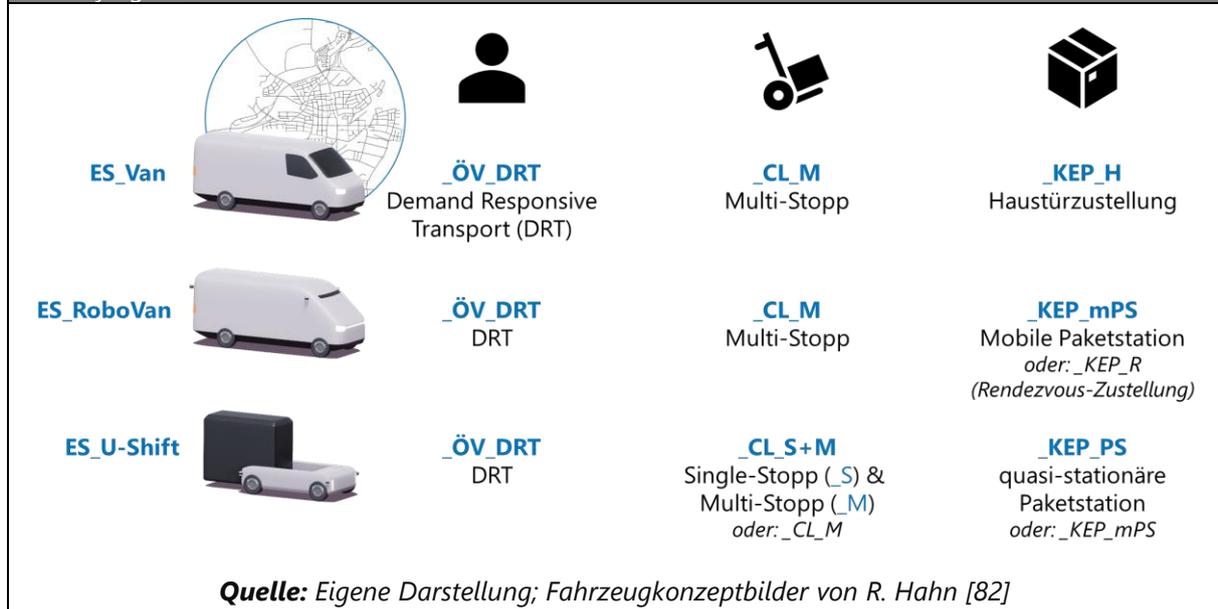
U-Shift wird als Fahrzeugkonzept mit dem höchsten Gesamtnutzen in dezidierten Modellen für Kostenanalyse und Ökobilanzierung detailliert betrachtet (Kapitel 5.5 und 5.6). Dazu werden im folgenden Kapitel zunächst Einsatzszenarien für verkehrliche Größen erarbeitet. Als Referenz wird der Status quo (Van) sowie dessen fahrerloses Pendant RoboVan als Transition zum fahrerlosen Fahren ebenfalls in die Detailanalyse mit einbezogen.

5.3 Quantifizierung der Einsatzszenarien

Das Fahrzeugkonzept U-Shift als Vertreter der Fahrzeugklasse mit dem höchsten Gesamtnutzen (Kapitel 5.2) wird hinsichtlich verkehrlicher Größen (dieses Kapitel), Kosten (Kapitel 5.5) und Umweltwirkungen (Kapitel 5.6) quantitativ untersucht. Als Referenz werden Van (Status quo) und dessen fahrerloses Pendant (RoboVan) betrachtet. Aus der Synthese der Fahrzeuge mit der Referenzanwendung S-Vaihingen (Kapitel 5.1) entstehen Einsatzszenarien entsprechend der Definition in Abschnitt 4.1.2. Abbildung 5.8 zeigt mögliche Einsatzzwecke der Fahrzeugkonzepte in der Referenzanwendung. Der Abbildung folgt eine Beschreibung der Zustellkonzepte.

Abbildung 5.8: Übersicht der Einsatzszenarien (ES)

Für die Referenzanwendung S-Vaihingen und die detailliert zu untersuchenden Fahrzeugklassen *ci* (Van), *ci** (RoboVan) und *sam* (U-Shift); ÖV: öffentlicher Verkehr, DRT: Demand Responsive Transport; CL: Citylogistik, KEP: x2C-Paketdienst



- ES;_ÖV_DRT: In der **Personenanwendung** unterscheiden sich die Fahrzeuge nicht. Alle ergänzen den ÖPNV gleichermaßen als On-Demand Ridepooling System im Demand Responsive Transport (DRT) Betrieb.
- ES;_CL_M: In der **Citylogistik**-Anwendung werden die integralen Fahrzeuge im Multi-Stopp betrieben, d. h. sie nehmen Waren mehrerer Kunden im Konsolidierungszentrum (UCC) auf und liefern diese in einer Rundtour aus. Die Anlieferung erfolgt während des Tages bzw. vor den Öffnungszeiten der Geschäfte.
- ES_U-Shift_CL_S+M: Das modulare Fahrzeugkonzept ermöglicht es, Transporteinheiten im Zielbereich von Kunden abzustellen. Das Single-Stopp-Konzept wird für eine Belieferung während der Nacht eingesetzt. Am nächsten Morgen holen Kunden ihre Waren selbst aus der Transporteinheit (quasi-stationäre Warenübergabestation) ab. U-Shift kombiniert die Single- mit einer Multi-Stopp-Belieferung (analog zu ES;_CL_M), da nicht alle Kunden bzw. Randbedingungen eine Single-Stopp-Lieferung erlauben. Eine Nachtzustellung wird von Expertinnen und Experten als sinnvoll eingeschätzt [385, S. 81].

- ES_Van_KEP_H: Status quo-Fahrzeuge werden für die **Paketlieferung** im Rahmen einer konventionellen Haustürzustellung eingesetzt: Zustellpersonal fährt das Fahrzeug und stellt die Pakete den x2C-Kunden individuell zu.
- ES_:_KEP_mPS: Eine andere Form der Paketzustellung wird durch fahrerloses Fahren möglich, indem der Aufbau dieser Fahrzeuge als mobile Paketstation (Warenübergabestation) konzipiert ist. Sie fahren in Zielbereiche und parken dort, sodass Anwohnende Pakete entnehmen können. Anschließend fahren sie zum nächsten Zielort. Nach mehreren Stopps werden sie im UCC erneut bestückt [31, 386].
- ES_RoboVan_KEP_R: Ein alternatives Zustellkonzept des fahrerlosen Status quos ist die Rendezvous-Zustellung. Dabei wird das Lieferfahrzeug im UCC beladen, fährt selbstständig in das Zustellgebiet und nimmt dort das Zustellpersonal³⁷ auf, welches damit eine kürzere Anreise hat. Durch eigenständiges Fahren und Parken kann sich das Zustellpersonal auf die Haustürzustellung konzentrieren. Im Projekt VanAssist wurde mit diesem Zustellkonzept eine gegenüber dem Status quo bis zu 30 % kürzere Tourdauer simuliert [386, 387].
- ES_U-Shift_KEP_PS: Durch die Trennung von Fahr- und Transporteinheit werden quasi-stationäre Paketstationen durch otram Fahrzeuge wie U-Shift ermöglicht. Diese werden im UCC bestückt, ausgeliefert und bleiben wie mobile Paketstationen am Zielort. Im Gegensatz zu mobilen Paketstationen stehen die Transporteinheiten länger an einem Ort und die Fahreinheiten können währenddessen weitere Transporte durchführen [31]. Im ES_U-Shift_KEP_PS wird die Paketstationen einmal je Tag gewechselt.

Bei den quasi-stationären Konzepten wird eine asynchrone Belieferung ermöglicht, d. h. die Lieferung ist von den Empfängern entkoppelt. Dadurch erhöht sich die Quote

³⁷ Die für das Zustellpersonal anfallenden Personalkosten werden gemäß des RCO-Formelsatzes in Kapitel 4.3, auch bei fahrerlosen Systemen berücksichtigt.

erfolgreicher Zustellungen und Anlieferungen können in Nebenverkehrszeiten erfolgen. Demgegenüber benötigen die Warenübergabesysteme Stellflächen, welche bei synchroner Belieferung deutlich kürzer beansprucht werden [388].

Die Transportbedarfe der Referenzanwendung wurden in Kapitel 5.1.2 ermittelt. Daraus werden die minimal benötigte Flottengröße sowie weitere verkehrliche Kenngrößen in den Unterkapiteln zu DRT, Citylogistik und KEP quantifiziert. Die Berechnungsgrundlage wurde in Kapitel 4.1.2 erarbeitet, zugrundeliegende Randbedingungen in Kapitel 5.1.1 und 5.1.2 definiert. Um Unsicherheiten bei ex-ante Betrachtungen (Kapitel 1) zu berücksichtigen, werden Parametervariationen und Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt.

5.3.1 Demand Responsive Transport im ÖPNV

Der Einsatz der untersuchten Fahrzeugkonzepte unterscheidet sich für den Einsatz im Demand Responsive Transport (DRT)-Betrieb nicht. Der Bedarf an Fahrzeugen wird entsprechend Formel (4.1) und den Inputparametern in Tabelle 5.6 ermittelt.

Tabelle 5.6: Inputparameter für das DRT-Einsatzszenario			
<i>Die Bandbreite wird zur Parametrisierung der Dreiecksverteilung in der Monte-Carlo-Simulation benötigt</i>			
Parameter	Einheit	Basiswert	Bandbreite
Mittlere Fahrstrecke	km	2,82	-
Ausgangsgeschwindigkeit	km/h	15	10–20
Haltezeit je Stopp	s	12	10–15
Lastanteil	-	87 %	60 %–100 %
Max. Kapazität	Personen	19	-
Mittlere Auslastung [Zuladung/Kapazität]	-	70 %	40 %–100 %
Transferzeit für Zu-/ Abfahrt	min	2	1–4

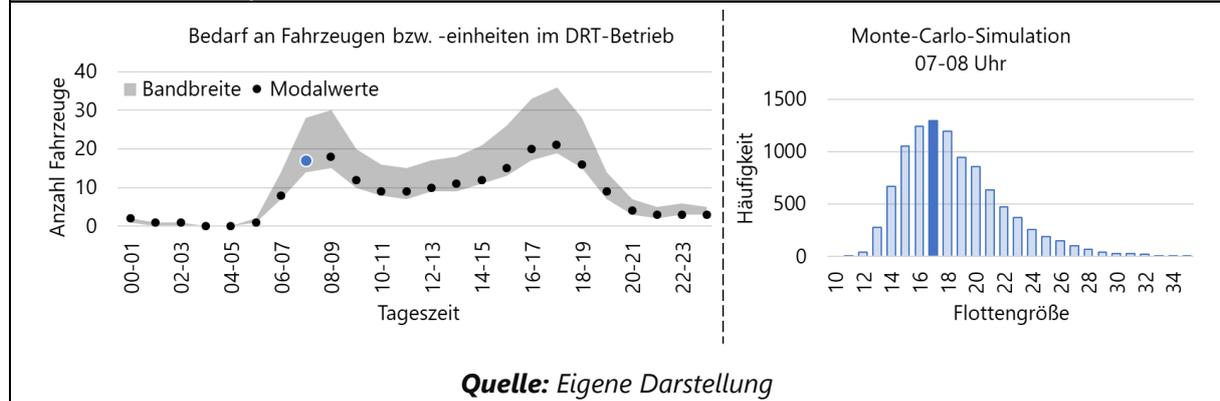
Quelle: Eigene Zusammenstellung mit den in Kapitel 3.2.1 und ab S. 91 ermittelten Werten

Abbildung 5.9 stellt in der linken Bildhälfte den Bedarf an Fahrzeugen anhand einer Tagesganglinie mit den typischen Peaks und ihrer Bandbreite dar. Der Bedarf wurde mit der in Kapitel 4.1 erarbeiteten Methode berechnet. Die Grenzfälle der

Parametervariation zeigt die Bandbreite möglicher Ergebnisse auf. Am maximalen Peak zwischen 17 und 18 Uhr variiert der Bedarf demnach zwischen 17 und 36 Fahrzeugen.

Abbildung 5.9: Fahrzeugbedarf im DRT-Betrieb

Bandbreite der Bedarfe je Tageszeit (links) und Monte-Carlo-Simulation mit 10.000 Iterationen für den Zeitraum zwischen 7:00 und 8:00 Uhr (rechts); Berechnung anhand der Inputparameter in Tabelle 5.6 und Methodik in Kapitel 4.1



Der **Modalwert der Monte-Carlo-Simulation** (Abbildung 5.9, rechts) stellt die wahrscheinlichste Anzahl benötigter Fahrzeuge dar: zwischen 7 und 8 Uhr werden z. B. 17 Fahrzeuge benötigt. Der Bedarf erreicht den Höchststand mit 21 Fahrzeugen am Nachmittag, in den Morgenstunden gibt es hingegen zwei Stunden ohne DRT-Betrieb. Die Auswertung in Tabelle 5.7 zeigt, dass jedes Fahrzeug täglich 93 km fährt. Die Ergebnisse sind für alle untersuchten Fahrzeuge gleichermaßen gültig.

Tabelle 5.7: Kenngrößen des DRT-Einsatzszenarios

Bei U-Shift (otrm-sam) werden zusätzlich Transporteinheiten in angegebenem Verhältnis benötigt; on-the-road integrale (otri) Fahrzeuge haben keine zusätzliche Transporteinheiten

Parameter	Van, RoboVan, U-Shift
Anzahl benötigter Fahrzeuge	21
Fahrleistung [km/Fzg.]	93
Transportleistung [pkm/Fzg.]	1.157
Auslastung [Zuladung/Kapazität]	65 %
Mittlere Einsatzzeit je Tag [h]	21
Anzahl Transporteinheiten	21
Verhältnis Transport- zu Fahreinheiten	1 (otrm); n. a. (otri)

Quelle: Eigene Zusammenstellung

In einer **Sensitivitätsanalyse** wird untersucht wie sich die Fahrzeuganzahl ändert, wenn einzelne Parameter um $\pm 25\%$ variiert werden: Tabelle 5.8. Die Fahrgeschwindigkeit sowie die beiden Last-Parameter haben einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis. Die Stopp- und Transferzeiten verursachen geringere Änderungen.

Tabelle 5.8: Sensitivitätsanalyse für das DRT Einsatzszenario

Sensitivität als Veränderung des Fahrzeugbedarfs gegenüber des Basisfalls bei Änderung der Parameter um [-25 %; +25 %]; *Wert ist auf maximal 100 % begrenzt

Parameter	Sensitivität
Mittlere Fahrgeschwindigkeit	[+25 %; -14 %]
Haltezeit je Stopp	[-7 %; +8 %]
Lastanteil*	[+25 %; -9 %]
Mittlere Auslastung*	[+25 %; -14 %]
Transferzeit für Zu-/ Abfahrt	[-2 %; +2 %]

Quelle: Eigene Zusammenstellung

5.3.2 Multi- und Single-Stopp-Belieferung in der Citylogistik

Während für den DRT-Betrieb die Bedarfe über den Tag aufgelöst bekannt sind, liegt die Nachfrage im Citylogistik-Bereich (exklusive x2C-Paketzustellung) aggregiert je Tag und Kunde vor (Ergebnis der Analyse in Kapitel 5.1). Entsprechend kann die Anzahl benötigter Fahrzeuge/ -einheiten nicht nach Tageszeiten aufgelöst berechnet werden. Stattdessen wird sie in Abhängigkeit des Einsatzzeitraums (eine bis mehrere Stunden) mit Formel (4.2) berechnet. Die Formel ist sowohl für den Multi-Stopp-Betrieb sowie dessen Kombination mit einer asynchronen Single-Stopp-Zustellung geeignet (Kapitel 4.1). Die Inputparameter entsprechen Tabelle 5.9.

Tabelle 5.9: Inputparameter für Citylogistik-Einsatzszenarien (exklusive x2C-KEP)

Wertfelder: Basiswert | Bandbreite; die Bandbreite wird zur Parametrisierung der Dreiecksverteilung in der Monte-Carlo-Simulation benötigt; M: Multi-Stopp; S: Single-Stopp

Parameter	Einheit	(Robo)Van (CL_M) 	U-Shift (CL_M) 	U-Shift (CL_S) 
Max. Einsatzzeit- raum		06–14 Uhr, ci*: zusätz- lich 17–21 Uhr	s. ci*_CL_M	21–06 Uhr
Kunden im Areal		595	357	238
Kunden je Stopp		1,30 1,00–1,40	s. Van	2,80 2,00–3,70
Fahrstrecke	km	3,02	s. Van	s. Van
Geschwindigkeit	km/h	20 15–30	s. Van	s. Van
Stopps je Tour		3 2–4	s. Van	1
Zeit je Stopp ³⁸	min	5 3–8	s. Van	7 3–18
Zeit im Depot ³⁸	min	19 15–25	s. U-Shift (CL_S)	2 1–4

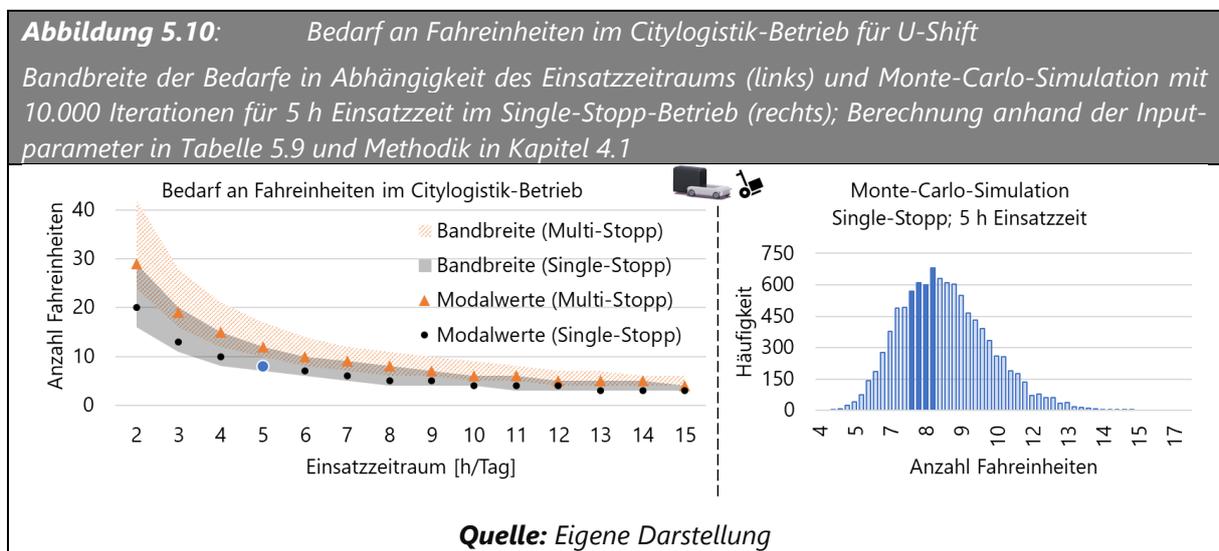
Quelle: Eigene Zusammenstellung mit den in Kapitel 3.2.2 und ab S. 95 ermittelten Werten

Orientiert an einer Befragung von Experten aus Handel, Stückgut und KEP wird der maximal zur Verfügung stehende Einsatzzeitraum für die unterschiedlichen Konzepte unterschieden. Die Van-Einsatzzeit (Status quo) orientiert sich an aktuellen Lieferzeitfenstern. Diese werden nach Expertenaussagen künftig um eine Abendzustellung zwischen 17 und 21 Uhr ergänzt [385, S. 73] (angewendet für RoboVan und U-Shift im Multi-Stopp-Betrieb).

Eine Nachtzustellung (21–06 Uhr) mit integralen, elektrischen Fahrzeugen hat das Potenzial 30 % der Transportverkehre in die Nacht zu verlagern [385, S. 195]. Dabei werden Empfängerpersonal benötigt und Geräusche beim Entladen verursacht [384, 385]. Für on-the-road modulare Fahrzeugkonzepte wird das Potenzial auf 40 % erhöht, da diese die Transporteinheit eigenständig abstellen, während das Entladen erst später durch das Personal erfolgt.

³⁸ Die Stoppzeiten für U-Shift basieren auf Herleitungen in Anhang G, die des Vans und RoboVans auf Literaturangaben [140, 389, 390].

Eine Monte-Carlo-Simulation, mit 10.000 Iterationen und einer Dreieckverteilung um die Basiswerte und der Bandbreite als Grenzwerte, wird entsprechend Kapitel 4.1 zur Ermittlung der Kenngrößen durchgeführt. Die Modalwerte des **Bedarfs an Fahreinheiten** in Abhängigkeit des Einsatzzeitraums liegen innerhalb der Bandbreite der Parametervariation. In Abbildung 5.10 ist der Bedarf an U-Shift-Fahreinheiten im Single- bzw. Multi-Stopp-Betrieb dargestellt. Bei gleichen Einsatzzeiten benötigt der Single-Stopp-Betrieb demnach weniger Fahreinheiten. Allerdings werden in der Single-Stopp-Zustellung mehr Transporteinheiten benötigt, da diese am Zielort verharren. Das Szenario ES_U-Shift_CL_S+M ist eine Kombination aus Single- und Multi-Stopp mit jeweils unterschiedlichen Einsatzzeiten.



Das Ergebnis der in Abbildung 5.10 (rechts) beispielhaft dargestellten Monte-Carlo-Simulationen stellt die Modalwerte der benötigten Fahreinheiten dar. Auf deren Basis werden die relevanten **Kenngrößen** der Einsatzszenarien im Citylogistik-Segment in Tabelle 5.10 ermittelt. Die Einsatzzeiten unterliegen den Randbedingungen in Tabelle 5.9. Beim U-Shift-Einsatzszenario werden beispielhaft 5 h im Single-Stopp-Betrieb und 7 h im Multi-Stopp-Betrieb angenommen. Die Disposition der Fahreinheiten über den Tag erfolgt in Kapitel 5.3.4 und ist von den anderen Einsatzzwecken abhängig. Für die Auslieferung der Güter im Citylogistik-Segment der Referenzanwendung benötigt U-Shift entsprechend Tabelle 5.10 weniger Fahreinheiten als die Vergleichsfahrzeuge.

Allerdings sind zusätzlich zu den 8 Fahreinheiten 114 Transporteinheiten erforderlich. Bei Van und RoboVan ist die Auslastung auf eine Kapazität von 4 Paletten bezogen, bei sam auf eine kurze Transporteinheit mit maximal 3 Paletten. Die kapazitive Restriktion ist gemäß der Nebenbedingung in Formel (4.2) berücksichtigt. Die Anzahl benötigter Transporteinheiten wird mit Formel (4.3) berechnet.

Tabelle 5.10: Kenngrößen der Citylogistik-Einsatzszenarien (exklusive x2C-KEP)

Bei U-Shift (otrm-sam) werden zusätzlich Transporteinheiten in angegebenem Verhältnis benötigt; das ES_U-Shift_CL_S+M Szenario wird aus den Szenarien ES_U-Shift_CL_M und ES_U-Shift_CL_S aggregiert; M: Multi-Stopp; S: Single-Stopp

Parameter	Van (CL_M) 	RoboVan (CL_M) 	U-Shift (CL_S+M) 
Einsatzzeit je Tag [h]	8	12	12
Anzahl benötigter Fahreinheiten	18	12	9
Fahrleistung [km]	1147	1147	1065
Fahrleistung [km/Fzg.]	64	96	118
Transportleistung [tkm]	253	253	223
Transportleistung [tkm/Fzg.]	14	21	25
Auslastung ³⁹ [Zuladung/Kapazität]	68 %	68 %	87 %
Anzahl Transporteinheiten	n. a.	n. a.	114
Verhältnis Transport- zu Fahreinheiten	n. a.	n. a.	13
Fahrleistung [km/Transporteinheit]	n. a.	n. a.	9
Transportleistung [tkm/Transporteinheit]	n. a.	n. a.	2

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Tabelle 5.11 stellt die **Sensitivität** der Eingangsparameter aus Tabelle 5.9 bei einer Änderung um $\pm 25\%$ dar. Neben der Einsatzzeit haben die Faktoren Kunden je Stopp und Stopps je Tour im Vergleich mit den anderen Parametern die signifikantesten Auswirkungen auf den Bedarf an Fahreinheiten. In der Parametervariation sind die beiden Werte durch das Produkt aus maximaler Fahrzeugkapazität und Waren je Kunde begrenzt. Die Fahrgeschwindigkeit hat bei den modularen Fahrzeugkonzepten eine

³⁹ Bei ci und ci* auf Kapazität von 4 Paletten bezogen, bei sam auf eine kurze Transporteinheit mit max. 3 Paletten.

höhere Auswirkung als bei den integralen Alternativen. Eine Änderung Zeit im Depot um $\pm 25\%$ bewirkt nahezu keine Veränderung des Bedarfs an Fahrereinheiten.

Tabelle 5.11: Sensitivitätsanalyse für Citylogistik-Einsatzszenarien (exklusive x2C-KEP)

Bandbreite der Parametervariation in Tabelle 5.9; Sensitivität als Veränderung des Bedarfs an Fahrzeugen/ -einheiten gegenüber des Basisfalls bei Änderung der Parameter um $[-25\%; +25\%]$; M: Multi-Stop; S: Single-Stop

Parameter	Van & RoboVan (CL_M) 	U-Shift (CL_M) 	U-Shift (CL_S) 
Einsatzzeit je Tag	[+33 %; -20 %]	[+33 %; -20 %]	[+33 %; -20 %]
Kunden je Stopp	[+33 %; -20 %]	[+42 %; -20 %]	[+42 %; -20 %]
Geschwindigkeit	[+12 %; -7 %]	[+18 %; -11 %]	[+23 %; -14 %]
Stopps je Tour	[+23 %; -14 %]	[+19 %; -11 %]	fixer Parameter
Zeit je Stopp ³⁸	[-7 %; +7 %]	[-10 %; +10 %]	[-6 %; +6 %]
Zeit im Depot ³⁸	[-9 %; +9 %]	[-1 %; +1 %]	[-2 %; +2 %]

Quelle: Eigene Zusammenstellung

5.3.3 Haustürzustellung und Paketstationen im KEP-Segment

Das Einsatzszenario des **Vans** (Status quo) für den KEP Betrieb folgt einer konventionellen Haustürzustellung (Abbildung 5.8). In der Praxis fährt jedes Fahrzeug eine Zustelltour je Tag [140, 391]. Da das Quelldepot in der Referenzanwendung S-Vaihingen signifikant näher am Zielgebiet liegt als in anderen Fällen, werden mehrere Touren je Fahrzeug möglich. Dies wird in der Berechnung unter Einhaltung von Zeiten zur Beladung der Fahrzeuge berücksichtigt und führt zu einem um ca. 30 % reduzierten Fahrzeugbedarf. Mit aus Fallstudien (Kapitel 3.2.2 und 4.1.2) abgeleiteten Eingangsgrößen ergibt sich eine benötigte Flotte von 9 Fahrzeugen, welche täglich je 10 h im Einsatz sind, durchschnittlich 67 km zurücklegen und dabei 270 Pakete am Tag transportieren: Tabelle 5.13.

Ein mögliches Einsatzszenario für den fahrerlosen **RoboVan** ist die Rendezvous-Zustellung (S. 115), welche der Haustürzustellung gleicht, aber effizienter ist: eine um bis zu 30 % kürzere Tourdauer wurde in ersten Simulationen erreicht [386, 387]. Entsprechend werden die Werte in Tabelle 5.13 für dieses Konzept aus der konventionellen

Haustürzustellung abgeleitet. Ein anderes Einsatzkonzept für den RoboVan sieht eine Auslieferung der Pakete in mobilen Paketstationen vor (KEP_mPS, Abbildung 5.8).

U-Shift liefert die Pakete im Szenario ES_U-Shift_KEP_PS in quasi-stationären Paketstationen aus. Die Anzahl benötigter Fahreinheiten wird für beide Varianten, KEP_mPS und KEP_PS, mit Formel (4.2) berechnet, wobei die Inputparameter entsprechend Tabelle 5.12 angepasst werden. Der Einsatzzeitraum mobiler Paketstationen wird von 8–18 Uhr im Status quo (Abbildung 3.1) um 3 h auf 8–21 Uhr erweitert [385, S. 73]. Die quasi-stationären Paketstationen werden nachts ausgeliefert, der Einsatzzeitraum ist abhängig von der Flottenverfügbarkeit. In Tabelle 5.12 werden beispielhaft 7 h angenommen.

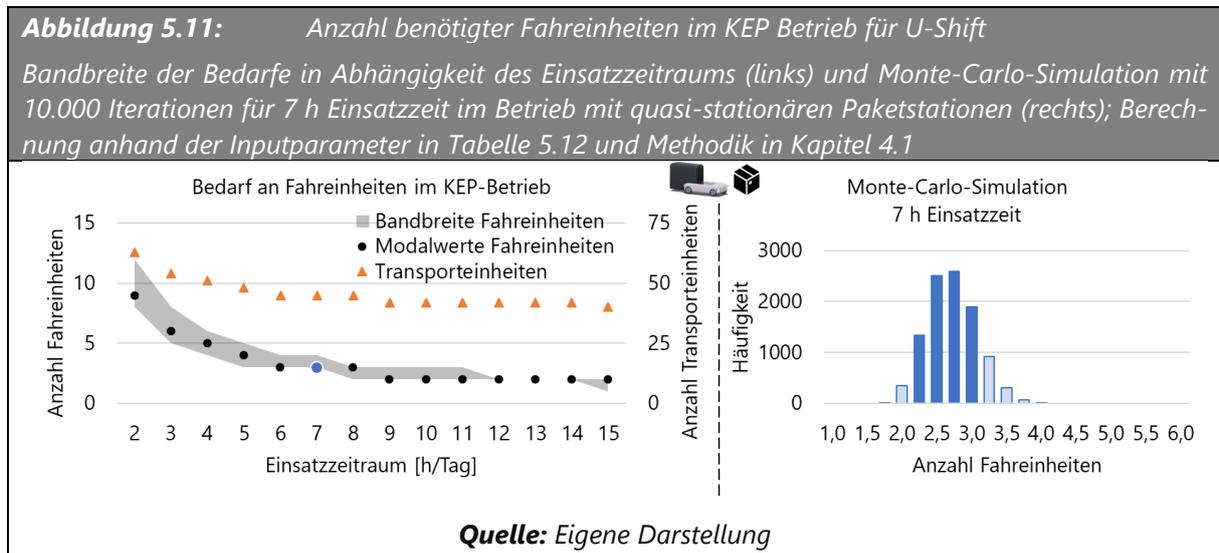
Tabelle 5.12: Inputparameter für KEP-Einsatzszenarien (exklusive x2B-KEP)			
<i>Wertfelder: Basiswert Bandbreite; die Bandbreite wird zur Parametrisierung der Dreiecksverteilung in der Monte-Carlo-Simulation benötigt; mPS: mobile Paketstation; PS: quasi-stationäre Paketstation</i>			
Parameter	Einheit	RoboVan (KEP_mPS) 	U-Shift (KEP_PS) 
Einsatzzeitraum	h	13	7
Kunden ⁴⁰ im Areal		32	36
Kunden ⁴⁰ je Stopp		1	1
Fahrstrecke	km	3,33	3,18
Geschwindigkeit	km/h	20 15–30	s. KEP_mPS
Stopps je Tour		3 1–13	1
Zeit je Stopp ³⁸	min	120 60–240	7 3–18
Zeit im Depot ³⁸	min	50 20–70	2 1–4

Quelle: Eigene Zusammenstellung mit den in Kapitel 3.2.2 und ab S. 99 ermittelten Werten

Abbildung 5.11 stellt den **Bedarf an Fahreinheiten** für verschiedene Einsatzzeiträume dar und gibt zusätzlich die Bandbreite der Ergebnisse an. Eine Monte-Carlo-Simulation ergibt den Wert mit der höchsten Wahrscheinlichkeit innerhalb der Bandbreite. Zusätzlich zeigt die Abbildung die Anzahl benötigter Transporteinheiten (relevant für quasi-

⁴⁰ „Kunden“ bezeichnet an dieser Stelle Standorte von Paketstationen anstatt individuelle Haushalte.

stationäre Paketstationen im U-Shift-Einsatzszenario). Wird die Flotte täglich z. B. 7 h eingesetzt, werden 3 Fahr- und 45 Transporteinheiten (Paketstationen) benötigt.



Die relevanten **Kenngrößen** der Einsatzszenarien in der x2C-Paketzustellung, die gemäß der Methodik in Kapitel 4.1.2 berechnet wurden, sind in Tabelle 5.13 zusammengefasst. Die Einsatzzeit des U-Shift-Einsatzszenarios (ES_U-Shift_KEP_PS) ist beispielhaft mit 7 h gewählt. Sie wird erst bei der Disposition in Abschnitt 5.3.4 festgelegt. Der Bedarf an Fahreinheiten ist mit einem Drittel des Status quos (Van) bei U-Shift am geringsten. Allerdings werden zusätzliche Transporteinheiten benötigt. Es werden mehr mobile Paketstationen (RoboVan) benötigt als Fahreinheiten zur Auslieferung der quasi-stationären Paketstationen (U-Shift). Dies deckt sich mit Ergebnissen aus der Literatur zu unterschiedlichen Konzepten in der Paketzustellung [31]. Die Fahrleistung ist bei Zustellungen in mobilen sowie quasi-stationären Paketstationen geringer als bei Haustürzustellungen.

Tabelle 5.13: Kenngrößen der KEP Einsatzszenarien (exklusive x2B-KEP)

Bei U-Shift werden zusätzlich Transporteinheiten in angegebenem Verhältnis benötigt; H: Haustürzustellung; mPS: mobile Paketstation; R: Rendezvous-Zustellung; PS: quasi-stationäre Paketstation

Parameter	Van (KEP_H) 	RoboVan (KEP_mPS) 	RoboVan (KEP_R) 	U-Shift (KEP_PS) 
Einsatzzeit je Tag [h]	10	13	10	7
Anzahl benötigter Fahreinheiten	9	6	7	3
Fahrleistung [km]	601	260	624	236
Fahrleistung [km/Fzg.]	67	43	89	79
Transportleistung [Paket-km]	10.258	9.905	10.258	7.975
Transportleistung [Paket-km/Fzg.]	1.140	1.651	1.465	2.658
Auslastung [Zuladung/Kapazität]	95 %	93 %	98 %	82 %
Anzahl Transporteinheiten (TE)	n. a.	n. a.	n. a.	45
Verhältnis Transport- zu Fahreinheiten	n. a.	n. a.	n. a.	15
Fahrleistung [km/TE]	n. a.	n. a.	n. a.	5
Transportleistung [Paket-km/TE]	n. a.	n. a.	n. a.	177

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Die Ergebnisse stimmen mit Schwerdfeger und Boysen (2022) überein, die verschiedene KEP-Zustellkonzepte anhand verkehrlicher Kennzahlen untersucht haben: Für Zustellkonzepte mit quasi-stationären Paketstationen (KEP_PS) wurden ebenfalls weniger benötigte Fahreinheiten, mehr benötigte Paketstationen sowie eine höhere Fahrleistung als für mobile Paketstationen (KEP_mPS) ermittelt [31].

Eine Variation der Parameter um $\pm 25\%$ wird zur Analyse von **Sensitivitäten** durchgeführt: Tabelle 5.14. Eine Variation der Einsatzzeit bedeutet in allen Einsatzszenarien die größte Veränderung der Anzahl benötigter Fahreinheiten. Mit Ausnahme des Einsatzes mobiler Paketstationen (ES_RoboVan_mPS) hat die Fahrgeschwindigkeit den zweithöchsten Einfluss auf den Bedarf an Fahreinheiten. Der Bedarf mobiler Paketstationen ist nach dem Parameter Einsatzzeit besonders sensitiv gegenüber der Stoppdauer.

Tabelle 5.14: Sensitivitätsanalyse für KEP-Einsatzszenarien (exklusive x2B-KEP)

Bandbreite der Parametervariation in Tabelle 5.12; Sensitivität als Veränderung des Bedarfs an Fahrzeugen/ -einheiten gegenüber des Basisfalls bei Änderung der Parameter um [-25 %; +25 %]; H: Haustürzustellung; mPS: mobile Paketstation; R: Rendezvous-Zustellung; PS: quasi-stationäre Paketstation

Parameter	Van (KEP_H) 	RoboVan (KEP_mPS) 	RoboVan (KEP_R) 	U-Shift (KEP_PS) 
Einsatzzeit je Tag	[+30 %; -19 %]	[+33 %; -20 %]	[+30 %; -19 %]	[+33 %; -20 %]
Geschwindigkeit	[+29 %; -17 %]	[+2 %; -1 %]	[+29 %; -17 %]	[+23 %; -14 %]
Stoppes je Tour	n. a.	[+5 %; -3 %]	n. a.	n. a.
Zeit je Stopp ³⁸	n. a.	[-21 %; +21 %]	n. a.	[-6 %; +6 %]
Zeit im Depot ³⁸	[-1 %; +1 %]	[-3 %; +3 %]	[-2 %; +2 %]	[-2 %; +2 %]

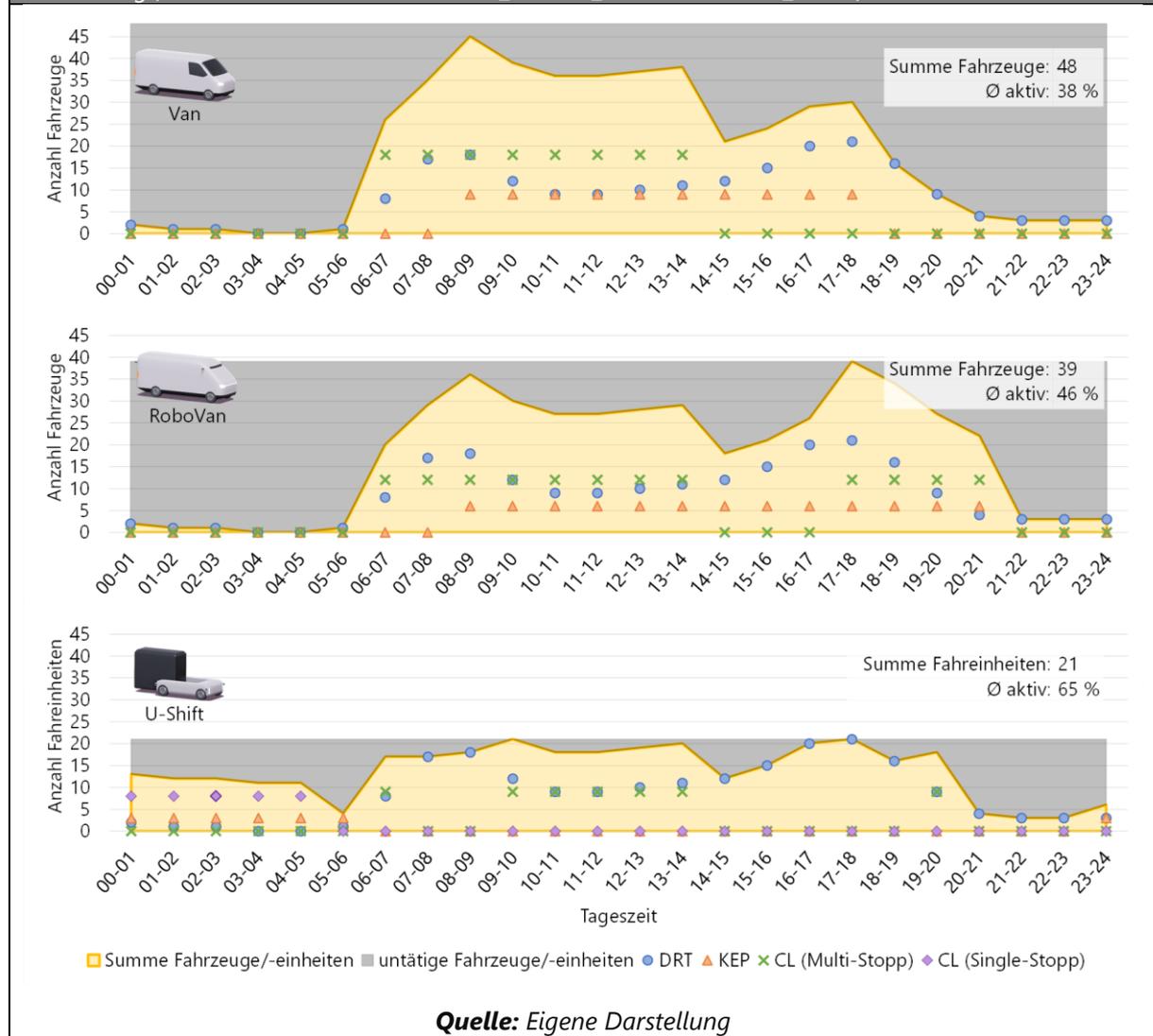
Quelle: Eigene Zusammenstellung

Die Rendezvous-Zustellung mit RoboVan benötigt mehr Fahrzeuge und eine höhere Fahrleistung als der Einsatz der RoboVan als mobile Paketstationen (Tabelle 5.13). Daher wird für die weitere Arbeit nur das Einsatzszenario ES_RoboVan_KEP_mPS berücksichtigt.

5.3.4 Aggregation der verkehrlichen Kenngrößen

Die benötigten Fahrzeuge bzw. -einheiten im DRT-Betrieb werden zur Ableitung des gesamten Flottenbedarfs, d. h. des Bedarfs weiterer Fahr- und Transporteinheiten, herangezogen. Unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen, wie der möglichen Einsatzzeiträumen für die Citylogistik- und KEP-Szenarien und benötigter Zeiten für elektrisches Laden, werden die Bedarfe für die jeweiligen Zwecke im Tagesverlauf eingeplant. Untätige Flotteneinheiten werden möglichst anderweitig eingesetzt. Trotz der für alle untersuchten Fahrzeugalternativen gleichen Bedarfe im DRT-Betrieb ist dessen Berücksichtigung daher wichtig, um inaktive Kapazitäten für andere Einsatzzwecke zu nutzen. Die Aggregation der Teileinsatzszenarien resultiert in den drei Einsatzszenarien ES_Van, ES_RoboVan und ES_U-Shift. Abbildung 5.12 stellt die **Bedarfe an Fahreinheiten für die gesamte Referenzanwendung** im Tagesverlauf dar.

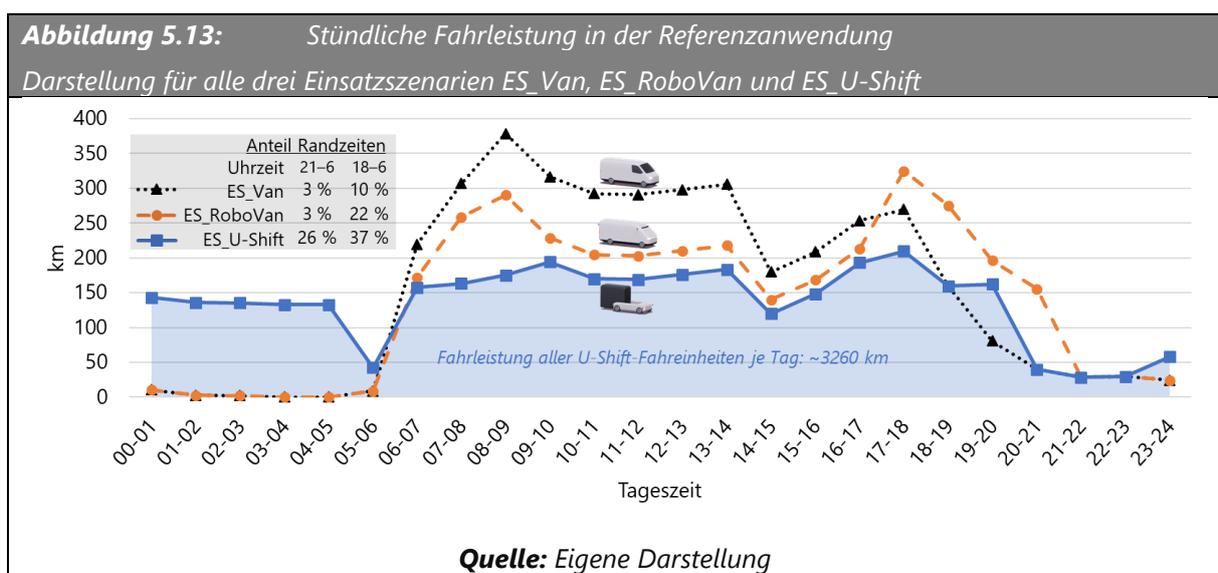
Abbildung 5.12: Bedarf an Fahreinheiten in der Referenzanwendung
Darstellung für alle drei Einsatzszenarien ES_Van, ES_RoboVan und ES_U-Shift



Die Einsatzzeiträume des Status quos (Van) überschneiden sich am stärksten, sodass in diesem Einsatzszenario die meisten Fahrzeuge benötigt werden. U-Shift ist es durch den modularen Aufbau möglich, auch in **Randzeiten** Teile der Bedarfe zu decken. Damit senkt sich dessen Bedarf an Fahreinheiten auf ca. die Hälfte des Status quos. Allerdings werden zusätzlich zu den 21 Fahreinheiten 180 Transporteinheiten benötigt. Die Verlagerung von Transporten in Randzeiten erhöht die durchschnittliche Aktivität der Fahreinheiten: 65 % der Zeit sind U-Shift-Fahreinheiten im Betrieb, 46 % die RoboVan-Einheiten, 38 % die des Status quos (Van). Dies stimmt mit Meinhardt et al. (2022) überein, die in einer Multi-Agent-Tourenoptimierung ebenfalls eine erhöhte Aktivität von

Fahreinheiten modularer Systeme ermittelt haben [33]. Obwohl die U-Shift-Fahreinheiten unter Berücksichtigung von Zeiten für elektrisches Laden bereits hoch ausgelastet sind, könnte die Auslastung durch eine Erweiterung der Referenzanwendung um weitere Einsatzzwecke oder ein größeres Einsatzgebiet voraussichtlich weiter erhöht werden.

Abbildung 5.13 zeigt, dass die **stündliche Gesamtfahrleistung** aller Fahreinheiten durch die Nutzung der Randzeiten verringert werden kann: Maximalwerte von 380 km je Stunde durch die Van-Fahrzeuge werden weder durch die RoboVan- (325 km) noch die U-Shift-Fahreinheiten (210 km) erreicht. Das in Kapitel 3.2.3 identifizierte Potenzial im kombinierten Transport, Verkehre in die Randzeiten außerhalb 6–18 Uhr (Abbildung 3.1) zu entzerren, wird durch U-Shift genutzt: 37 % der Fahrleistung entsteht außerhalb der Tageszeiten mit hohem Verkehrsaufkommen, beim Van-Einsatzszenario entfallen dagegen nur 10 % auf diesen Zeitraum. Die Entzerrung verbessert die Verkehrssituation, indem die Staufahrt reduziert und der Verkehrsfluss insgesamt optimiert werden kann [384]. Das Integral der Kurve in Abbildung 5.13 stellt die gesamte Fahrleistung der Fahreinheiten je Tag dar. Diese ist bei U-Shift mit 3260 km um ca. 12 % respektive 3 % geringer als beim Van und RoboVan. D. h., die Fahrleistung ist ähnlich hoch, trotz signifikant weniger Fahreinheiten bei U-Shift im Vergleich zu den Referenzfahrzeugen.



Relevante **Kenngrößen** der drei Einsatzszenarien in der Referenzanwendung S-Vaihin-gen sind in Tabelle 5.15 zusammengefasst. Die quantifizierten Einsatzszenarien sind wichtige Eingangsparameter für die nachfolgende Kostenanalyse (Kapitel 5.5) und Ökobilanzierung (Kapitel 5.6). Zudem werden die Ergebnisse bei der Analyse des disruptiven Potenzials in Abschnitt 6.2 berücksichtigt.

Tabelle 5.15: Kenngrößen der Einsatzszenarien in der Referenzanwendung				
Kenngröße		ES_Van 	ES_RoboVan 	ES_U-Shift 
Flottengröße	Fahreinheiten	48	39	21
	Transporteinheiten	n. a.	n. a.	180
Fahrleistung	gesamt [Tsd. km p. a.]	1.123	1.020	988
	je Fahreinheit [km je Tag]	77	86	155
Aufkommen [in Tsd.]	DRT [Personen p. a.]	2.611	2.611	2.611
	Citylogistik [Pakete p. a.]; [Paletten p. a.]; [Tonnen p. a.]	228; 133; 22	228; 133; 22	228; 133; 22
	KEP (x2C) [Pakete p. a.]	738	738	738
Transportlei- stung [in Tsd.]	DRT [Personen-km p. a.]	7.362	7.362	7.362
	Citylogistik [Tonnen-km p. a.]	77	77	67
	KEP [Paket-km p. a.]	3.108	3.001	2.416
Auslastung der Trans- portkapazität	DRT	66 %	66 %	66 %
	Citylogistik	68 %	68 %	87 %
	KEP	95 %	93 %	82 %

Quelle: Eigene Zusammenstellung der Ergebnisse aus den Kapiteln 5.3.1, 5.3.2 und 5.3.3

Für die **Validierung des Vorgehens** wird die jährliche Fahrleistung im Einsatzszenario ES_Van mit statistischen Werten von Status quo-Nutzfahrzeugen verglichen (EG-Fahrzeugklasse N1, d. h. nur Güteranwendung). Diese liegt ohne Berücksichtigung des DRT-Einsatzzwecks bei ca. 19.600 km p. a. je Fahrzeug, die statistischen Fahrleistungen für Deutschland bei 7.900 km für den Nahbereich und 24.400 km für den Regionalbereich [37, S. 105]. Eine Auswertung für Großbritannien ermittelte 15.500 km p. a. für das Segment leichter Nutzfahrzeuge [392, S. 38].

Eine simulationsgestützte Disposition on-the-road modularer Flotten durch Hatzenbühler et al. (2022) ergab eine Reduktion der Fahreinheiten gegenüber Flotten von fahrerlosen, integralen Fahrzeugen um 35 %, bei gleichzeitig ca. 130 % mehr Transport- als Fahreinheiten. Zudem verursacht die modulare Flotte je nach Randbedingung 0–20 % weniger Fahrzeugkilometer [13]. Die U-Shift-Einsatzszenarien ergeben ähnliche Werte für den Vergleich von RoboVan- und U-Shift-Fahreinheiten (ca. 45 %) sowie der Fahrleistung (ca. 10 %).

Das Vorgehen zur Quantifizierung der Einsatzszenarien liefert demnach plausible Ergebnisse, wobei die Referenzanwendung eine hohe Auslastung der Fahrzeuge vorsieht.

Die ermittelten Kenngrößen sind für die Referenzanwendung S-Vaihingen und die untersuchten Fahrzeugkonzepte zutreffend. Die Berechnungen unterliegen dabei unter anderem den Randbedingungen und ergänzenden Anmerkungen in Kapitel 5.1.1. Z. B. wurde für die Fahrgeschwindigkeit ein 24h-Durchschnittswert angenommen. Mögliche Vorteile durch höhere Geschwindigkeiten während Nachtfahrten, die vor allem bei U-Shift und RoboVan konzeptionell möglich sind, wurden durch eine Sensitivitätsanalyse des Parameters Geschwindigkeit aufgezeigt.

Fahrerloses Fahren, neue Zustellkonzepte und die on-the-road Modularität sind noch in der Erprobung, weshalb Erfahrungswerte aus dem Echtbetrieb fehlen. Die durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen und Parametervariationen zeigen die Bandbreite möglicher Ergebnisse auf. Die Untersuchung von Synergieeffekten mit weiteren Einsatzzwecken bietet das Potenzial einer höheren Flotteneffizienz, welche durch eine softwaregestützte Optimierung des Vehicle Routing Problems gegebenenfalls weiter gesteigert werden kann (Kapitel 4.1.2).

5.4 Spezifikation der Fahrzeugkonzepte

In diesem Kapitel werden die für die quantitative Analyse der Kosten (Kapitel 5.5) und Umweltwirkungen (Kapitel 5.6) notwendigen Fahrzeugspezifika für Van, RoboVan und

U-Shift ermittelt. Zunächst erfolgt die Herleitung und Begründung der Werte, die anschließend am Ende des Kapitels in Tabelle 5.17 zusammengefasst dargestellt werden.

Die kalendarische Lebensdauer der untersuchten Fahrzeuge wird als Quotient der Gesamtleistung von Status quo-Fahrzeugen durch ihre jährliche Fahrleistung im Einsatzszenario festgelegt. Dies gilt unter der Annahme, dass sich die Gesamtleistung neuartiger Fahrzeuge und die des Status quos entsprechen. Für die **Lebensdauer** von Status quo-Fahrzeugen wird die KBA-Statistik zu Außerbetriebssetzungen [393] ausgewertet: Nach 19 Jahren wurden im Jahr 2021 95 % der Fahrzeuge mit einer Nutzlast zwischen 1–1,5 t (orientiert am Median der Elektrotransporter aus der ADAC-Fahrzeugdatenbank [394], Anhang B) außer Betrieb gesetzt. Dieser Wert entspricht den Literaturannahmen [250, 392]. Die statistische jährliche Fahrleistung nach Fahrzeugalter wird der KBA-Zeitreihe „Verkehr in Kilometern“ [395] entnommen und bis 19 Jahre Lebensdauer aggregiert. Die **Gesamtleistung** der untersuchten Fahrzeuge wird damit auf 325.000 km festgelegt und liegt somit innerhalb der Bandbreite von Literaturwerten: 185.000–560.000 km [37, 242, 250, 392, 396]. Die Fahreinheiten erreichen ihr Lebensende somit nach 19 Jahren oder 325.000 km, je nach Laufleistung des Einsatzszenarios (Kapitel 5.3).

Für die **Lebensdauer der U-Shift-Transporteinheiten** gibt es keine Referenzdaten. Daher werden diese anhand vergleichbarer Einheiten im Nutzfahrzeugsegment angenähert. Die Lebensdauer der U-Shift-Transporteinheiten für den Citylogistik-Einsatz wird aus der KBA-Statistik zu Außerbetriebssetzungen von Kraftfahrzeuganhängern [393] mit 26 Jahre abgeleitet. Für die U-Shift-Paketstation (KEP) wird mit 21 Jahre eine geringere Lebensdauer angenommen, da diese komplexer als die Güter-Transporteinheit ist. Für die Transporteinheit im Personentransport werden 17 Jahre angenommen, angelehnt an die KBA-Statistik zu Außerbetriebssetzungen von Kraftomnibussen (21 Jahre) [393] unter der Annahme einer geringeren Lebensdauer aufgrund der steigenden Komplexität durch Automatisierungskomponenten.

Zur Ermittlung der **Batterie-Lebensdauer** wird eine Metaanalyse von 7 Studien durchgeführt [244–250]: Die Mittelwertbildung resultiert in einer Laufleistung von 195.000 km und einer kalendarischen Lebensdauer von 7,83 Jahre (Standardabweichung von 26 %, respektive 13 %) bis sich die Ausgangskapazität um 20–30 % reduziert hat [247]. Anschließend könnten diese Batterien in stationären Energiespeichern eingesetzt werden [264]. Im Vergleich hierzu werden für die Traktionsbatterie im Tesla Model 3 (meistverkaufter Elektro-Pkw in Deutschland 2021 [397]) 192.000 km oder 8 Jahre garantiert [398]. Die Batterie-Lebensdauer für diese Arbeit ergibt sich daraus, ob zuerst 200.000 km Laufleistung oder 8 Jahre erreicht werden. Dies ist abhängig von der jährlichen Fahrleistung im Einsatzszenario (Kapitel 5.3). Es wird angenommen, dass Traktionsbatterien ausgetauscht werden können, wenn ihr Lebensende vor dem der Fahreinheit eintritt [263, 283].

Das **Leergewicht** der Referenzfahrzeuge wird anhand des Mercedes-Benz Sprinter Kastenwagens und Tourers abgeleitet [394]. Die Gewichtsangaben von U-Shift sind Primärdaten aus dem Forschungsprojekt U-Shift II [79] für eine visionäre Serienversion des Fahrzeugkonzepts.

Für die Ermittlung des Energieverbrauchs und der Batteriekapazität von U-Shift wurden **Simulationen** durchgeführt, um das Potenzial verteilter Energiespeicher in den Fahr- und Transporteinheiten (TE) zu untersuchen. In der ersten Simulation von Schall et al. (2021) wurden die Batterien in den Personentransport-TE für die Verbraucher der TE (unter anderem Klimatisierung) selbst sowie das Laden der Batterie in der Fahreinheit verwendet [399]. In einer angepassten Untersuchung durch Mrdovic (2022) [400] im Rahmen des Forschungsprojekts U-Shift II [79] wurden die Ladeverluste verringert, indem die Fahreinheit die Traktionsenergie immer dann der TE-Batterie entnimmt, wenn eine Personentransport-TE mit Batterie gekoppelt ist. Damit wird die Traktionsbatterie der Fahreinheit langsamer entladen [400]. In beiden Simulationen wurde ein generischer Fahrzyklus für die kombinierte Anwendung in Personen- und Gütertransport aus bestehenden Fahrzyklen erstellt. Da der Anwendungsfall der zweiten Simulation dem

Einsatzszenario in Kapitel 5.3 besser entspricht als die erste Simulation, basiert die vorliegende U-Shift-Spezifikation auf der zweiten Simulation.

Der aus der Simulation ermittelte **Energieverbrauch** des U-Shifts berücksichtigt neben der Traktionsenergie und konventionellen Nebenverbrauchern, wie der Klimatisierung, auch den zusätzlichen Verbrauch für fahrerloses Fahren. Der Energieverbrauch der Referenzfahrzeuge Van und RoboVan wird aus der Simulation abgeleitet, wobei für Van-Fahrzeuge der Energiebedarf für die Automatisierung (ca. 12 kWh/100 km) exkludiert wird. Je nach Studie und Szenario wird durch die Automatisierung von einer Reduzierung [40, 259] oder Erhöhung [257, 259] des Energiebedarfs ausgegangen. Einig sind sich die Studien, dass die Automatisierung zunächst Mehrenergie bedarf, welche durch Effizienzpotenziale aber (zum Teil) wieder kompensiert werden kann [40, 271]. Vor allem für Platooning wird ein hohes Effizienzpotenzial angenommen [259, 269], wobei diese Funktion in der Referenzanwendung (Kapitel 5.1) mit urbanem Bezug nicht sinnvoll eingesetzt werden kann. Zudem berücksichtigt der Fahrzyklus der Referenzanwendung einen signifikanten Anteil im öffentlichen Personentransport, gekennzeichnet durch einen hohen Anteil von Stoppzeiten, in denen die kontinuierlichen Verbraucher durch die Automatisierung weiterhin Energie benötigen [399, 400]. Beide Faktoren erklären den erhöhten Energiebedarf, den die Automatisierung in der Simulation verursacht. Für Van-Fahrzeuge im Güterverkehr wird ein Energieverbrauch von 30 kWh/100 km aus der Simulation abgeleitet. Dies entspricht dem 65. Perzentil vergleichbarer Status quo-Fahrzeuge in der ADAC-Fahrzeugdatenbank [394] (Anhang B). Der Verbrauchswert des vergleichbaren Mercedes-Benz eSprinter wird je nach Modell mit 32–37 kWh/100 km angegeben [52, 394]. Der Simulationswert und eine zukünftige eSprinter-Generation stimmen unter der Annahme eines Entwicklungsfaktors von 1,5 % p. a.⁴¹ überein. Alle Fahrzeugkonzeptalternativen basieren auf derselben

⁴¹ Angelehnt an einen Entwicklungsfaktor von ca. 3 % p. a. für Automatisierungskomponenten (Herleitung in Kapitel 5.6.1) und der Annahme, dass Elektrifizierungskomponenten als reifere Technologie geringere Lernraten aufweisen.

Simulationsgrundlage, wobei Sensitivitätsanalysen Variationen des Energiebedarfs untersuchen. Die auf dieselbe Weise aus der Simulation ermittelten Energieverbräuche der übrigen Fahreinheiten sind in Tabelle 5.17 aufgeführt.

Die **Kapazität der Traktionsbatterie** der untersuchten Referenzfahrzeuge wird anhand des Energieverbrauchs und einer täglichen Mindestreichweite ausgelegt. Aus der ADAC-Fahrzeugdatenbank für die Sprinter-Klasse wurde ermittelt, dass 95 % der untersuchten Fahrzeugmodelle eine elektrische Reichweite von mehr als 150 km im WLTP-Fahrzyklus aufweisen (Anhang B) [394]. Diese wird für die in dieser Arbeit betrachteten Fahrzeuge als Mindestanforderung definiert, da darunter keine sinnvolle Weiterverwendung der Fahrzeuge in Second-Life-Anwendungen angenommen werden kann. Die tägliche Mindestreichweite für die Berechnung der Batteriekapazität entspricht somit der in den Einsatzszenarien (Kapitel 5.3) ermittelten Tagesfahrleistung der Fahrzeuge, mindestens jedoch der oben beschriebenen Mindestanforderung von 150 km. Van-Fahrzeuge für die Güteranwendung benötigen demnach 45 kWh Batteriekapazität, berechnet aus dem ermittelten Energieverbrauch von 30 kWh/100 km (S. 133) multipliziert mit dem Maximum aus Tagesfahrleistung (Tabelle 5.15) und 150 km: $30 \text{ kWh}/100 \text{ km} \cdot 150 \text{ km}$. Auf die gleiche Weise werden 55 kWh für Van-Fahrzeuge im Personentransport und 60 kWh respektive 80 kWh für RoboVan-Fahrzeuge im Güter- bzw. Personentransport berechnet. Für U-Shift werden die Batteriekapazitäten aufgrund der Verteilung von Energiespeichern in Fahr- und Transporteinheit direkt der Simulation (S. 132) entnommen: 65 kWh für die Fahreinheit und 35 kWh für die Transporteinheit im Personentransport. Damit werden die oben genannten Mindestanforderungen erfüllt. Die Kapazität der Traktionsbatterie der U-Shift-Fahreinheit ist wie der Energieverbrauch ein Mittelwert aus der Personen- und Güteranwendung.

Der RoboVan wird fahrerlos betrieben und benötigt daher LiDAR, Radar, Kamera und Ultraschallsensoren sowie Komponenten für die Kommunikation und Positionierung. Zudem sind leistungsfähige Rechner erforderlich. Dasselbe **Sensorsetup** wird für die U-Shift-Fahreinheit angenommen. Für ein umfassendes Sichtfeld bei überlangen

Transporteinheiten muss die U-Shift-Transporteinheit im Personentransport mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet werden (Herleitung in Anhang G: Abbildung G.1). Die Van-Fahrzeuge verfügen über Assistenzsysteme, für die ebenfalls Sensoren benötigt werden, allerdings in geringerer Anzahl und mit weniger leistungsfähigen Recheneinheiten. Die Auswertung verschiedener Studien [269, 401–403] ergibt die benötigten Komponenten in Tabelle 5.16.

Tabelle 5.16: Sensorsetup der Fahrzeugalternativen				
Abkürzungen: Fahreinheit (FE); Transporteinheit für den Personentransport (TE-P); Globales Navigationssatellitensystem (GNSS); Grafikprozessor (GPU, graphics processing unit)				
Komponente	Van 	RoboVan 	U-Shift FE 	U-Shift TE-P 
LiDAR	0	3	3	0
Radar	4	7	7	2
Kamera	2	5	5	1
Ultraschall	9	9	9	4
GNSS	1	1	1	0
Kommunikationsmodul	1	2	2	0
„Standard“ Rechner	1	3	3	0
„Hochleistungsrechner“ (GPU)	0	1	1	0

Quelle: Eigene Zusammenstellung, basierend auf einer Auswertung von [269, 401–404]

Die Fahreinheiten der Systemalternativen werden im Depot geladen, wobei die benötigte **Ladeinfrastruktur** mit der Flottengröße und -zusammensetzung korreliert. Aus der Analyse der Einsatzszenarien ist bekannt, wie viele Einheiten durchschnittlich je Stunde inaktiv sind: bei Van aufgerundet 22, RoboVan 27 und U-Shift 9 Fahreinheiten und 12 Personen-Transporteinheiten. Für jede dieser Einheiten wird vereinfachend eine Ladesäule vorgesehen, wobei ein Drittel der U-Shift-Fahreinheiten aufgrund ihrer hohen Auslastung und nur kurzen Verweildauer im Depot eine Ladeinfrastruktur mit höherer Leistung benötigen.

Die abgeleiteten Spezifikationen sind in Tabelle 5.17 aufgeführt.

Tabelle 5.17: Spezifikation von Van, RoboVan und U-Shift

*gegebenenfalls Unterscheidung in Einheiten für die Personen- (P) und Güteranwendung (G); weitere Unterscheidung von G in Citylogistik (CL) und Paketdienst (KEP); #die Werte beziehen sich auf die U-Shift-Fahreinheit (FE) und -Transporteinheiten (TE); gerundete Werte

Parameter	Einheit	Van* 	RoboVan* 	U-Shift# 	
Flotte		P: 21	P: 21	FE: 21	TE (P): 21
		G: 27	G: 18	TE (CL): 114	TE (KEP): 45
Fahrleistung je FE	Tsd. km	P: 28	P: 28	47	
	p. a.	G: 20	G: 24		
Flottenfahrleistung	Tsd. km	1.123	1.020	987	
	p. a.				
Mittlerer Energieverbrauch	kWh/	P: 38	P: 52	49	
	100 km	G: 30	G: 40		
Batteriekapazität	kWh	P: 55	P: 80	FE: 65	
		G: 45	G: 60	TE (P): 35	
Leergewicht inklusive Batterie	kg	P: 2.459	P: 2.559	FE: 1.860	TE (P): 1.680
		G: 2.267	G: 2.421	TE (CL): 300	TE (KEP): 600
Berechnetes Lebensende der FE und TE ⁴²	Jahre	P: 11	P: 11	FE: 7	TE (P): 17
		G: 17	G: 14	TE (CL): 26	TE (KEP): 21
Berechnetes Lebensende der Traktionsbatterien ⁴³	Jahre	P: 7	P: 7	FE: 4	
		G: 8	G: 8	TE (P): 7 ⁴⁴	
Automation		assistiert	fahrerlos	fahrerlos	
Anzahl der Ladesäulen: 22 kW 43 kW		27 0	22 0	17 3	

Quelle: Eigene Zusammenstellung mit Werten aus Kapitel 5.3 und den Herleitungen in Kapitel 5.4

⁴² Das kalendarische Lebensende der FE entspricht gemäß der Herleitung in Kapitel 5.4 dem Minimum aus der Lebensdauer und der Division der Gesamtleistung durch die fahrzeugspezifische Jahresfahrleistung, welche im Einsatzszenario (Kapitel 5.3) ermittelt wurde. So führt z. B. die höhere Jahresfahrleistung der U-Shift-Fahreinheiten zu einem früheren Lebensende im Vergleich zu Van oder RoboVan.

⁴³ Das Lebensende der Traktionsbatterien hängt davon ab, ob zuerst der kalendarische (8 Jahre) oder der laufleistungsabhängige (200.000 km) Grenzwert erreicht wird (Herleitung in Kapitel 5.4).

⁴⁴ Die Batterie in der U-Shift-Transporteinheit für den Personentransport wird auch als Traktionsbatterie verwendet. Die Fahrleistung dieser Transporteinheiten ist geringer als die der Fahreinheiten (Kapitel 5.3). Dies erklärt die längere Lebensdauer.

5.5 Berechnung der Relevant Cost of Ownership

Anhand des in Kapitel 4.3 entwickelten RCO-Modells werden im Folgenden die Kosten der Fahrzeugkonzepte Van, RoboVan und U-Shift für die Einsatzszenarien in Kapitel 5.3 analysiert, vergleichend bewertet und mögliche Unsicherheiten untersucht. Die Flotten wurden in Abschnitt 5.4 spezifiziert, weitere relevante Eingangsgrößen für die Kostenanalyse werden im Teilkapitel 5.5.1 erarbeitet.

5.5.1 Ableitung der Fahrzeugkosten und Parametrisierung des RCO-Modells

Die **Fahrzeugkosten** für Van und RoboVan werden anhand von Marktpreisen aktueller Elektrotransporter in der ADAC-Fahrzeugdatenbank [394] für das Jahr 2040 abgeleitet, unter Verwendung der Erfahrungskurventheorie, nach der sich die Herstellkosten bei einer kumulierten Verdopplung der Produktionsmenge um eine angenommene Lernrate reduzieren [211]. Für U-Shift-Einheiten existieren keine vergleichbaren Fahrzeuge am Markt, weshalb deren Kosten anhand von Primärdaten des U-Shift-Entwicklungsteams unter Anwendung der Erfahrungskurventheorie abgeleitet werden. Das detaillierte Vorgehen und die getroffenen Annahmen finden sich in Anhang J, die Fahrzeugneupreise werden aus den Herstellkosten und dem Retail Price Equivalent (1,45, Kapitel 4.3.3) berechnet: Tabelle 5.18.

Tabelle 5.18: Herstellkosten der Fahrzeugalternativen im Jahr 2040 (*exklusive Traktionsbatterien)
Werte auf 100 EUR₂₀₂₀ gerundet; Abkürzungen: Demand Responsive Transport (DRT: Personentransport), Citylogistik (CL), Paketdienst (KEP); Fahreinheit (FE); Transporteinheit (TE)

Fahr- bzw. Transporteinheit	Herstellkosten: HK	Neupreis: $HK \times RPE (1,45)$
Van (DRT)* 	25.100	36.400
Van (CL und KEP)* 	20.800	30.200
RoboVan (DRT)* 	32.100	46.500
RoboVan (CL und KEP)* 	27.800	40.300
U-Shift FE* 	28.000	40.600
U-Shift TE: DRT* KEP CL 	14.700 4.500 2.500	21.300 6.500 3.600

Quelle: Eigene Zusammenstellung, mit Werten aus Anhang J

Bei der U-Shift-Fahreinheit entfallen die Kosten für den Aufbau und für die Interieur-Komponenten. Allerdings benötigt ein U-Shift-System zusätzlich ein Hubsystem in der Fahreinheit und eine mechanische sowie elektrische Kopplung zwischen Fahr- und Transporteinheit, sodass eine U-Shift-Fahreinheit in etwa den Kosten eines RoboVan-Güterfahrzeugs entspricht. Aus der Kopplung von Fahr- und Transporteinheiten resultieren Herstellkosten für U-Shift von 28.000 EUR₂₀₂₀ zuzüglich 14.700 EUR₂₀₂₀ (Personentransport) bzw. 2.500 EUR₂₀₂₀ (Gütertransport), die damit um ca. 30 % bzw. 10 % höher als bei vergleichbaren RoboVan-Fahrzeugen liegen. In der RCO-Analyse werden jedoch Flotten und damit systemische Kosten betrachtet (Kapitel 4.3). Der Einfluss der Herstellungskosten auf das Ergebnis wird in einer Sensitivitätsanalyse untersucht.

Die **Haltedauer** der Fahreinheiten wird gemäß Literaturangaben mit 6 Jahren angenommen [37, 216] und entspricht damit der betriebsgewöhnlichen Nutzung [231]. Neben einer kalendarischen Haltedauer kann diese auch als von der Fahrleistung abhängig definiert werden. Die unterschiedliche Fahrleistung der Fahrzeugalternativen während der Haltedauer (Kapitel 5.3) wird über eine Restwertermittlung berücksichtigt. Die Transporteinheiten von U-Shift sind anwendungsoptimiert für die jeweiligen Einsatzzwecke und haben damit voraussichtlich keinen nennenswerten Second-Life-Gebrauchmarkt. Deshalb wird die Haltedauer der Transporteinheiten mit deren jeweiligem Lebensende und Restwert Null gleichgesetzt.

Die **Kosten für das Fahrpersonal** im Van-Betrieb werden entsprechend Kapitel 4.3 den Gesamtkosten der Fahrzeuge zugerechnet. Das statistische Bundesamt gibt Bruttoverdienste nach Berufsgruppen für Deutschland im Jahr 2021 an [405]. Die Lohnkosten werden mit einer durchschnittlichen Steigerung um 1,5 % p. a. verknüpft [406], wodurch sich für das Referenzjahr 2040 Bruttostundenlöhne von 25 EUR₂₀₂₀/h im Personentransport und der Paketzustellung sowie 20 EUR₂₀₂₀/h im Gütertransport der Citylogistik ergeben.

Die Infrastrukturkosten umfassen Kosten für die **Ladeinfrastruktur**, deren Anzahl in Kapitel 5.4 spezifiziert wurde. Die Van- und RoboVan-Fahrzeuge sowie die U-Shift-

Transporteinheit für den Personenverkehr werden an einer Ladeinfrastruktur mit 22 kW, die höher ausgelasteten U-Shift-Fahreinheiten für kürzere Ladezeiten an 43 kW-Ladesäulen geladen. Die Anschaffungskosten betragen 4.290 EUR₂₀₂₀ (22 kW) bzw. 8.530 EUR₂₀₂₀ (43 kW) [37], deren Lebensdauer 15 Jahre [407]. Es wird angenommen, dass die Haltedauer der Lebensdauer entspricht. Anhand der Erfahrungskurventheorie in Anhang J werden die Kosten unter der Annahme einer 6-fachen, kumulierten Absatzmenge⁴⁵ und einer Lernrate von 10 % (branchenüblich im Maschinenbau [211]) auf 3.270 EUR₂₀₂₀ (22 kW) und 6.490 EUR₂₀₂₀ (43 kW) ermittelt. Jährlich entstehen zudem 1.350 EUR₂₀₂₀ laufende Kosten unabhängig von der Ladeleistung [37].

Weitere Annahmen und Randbedingungen der Kostenanalyse umfassen:

- Die Referenzanwendung S-Vaihingen ist auf das Jahr 2040 datiert und in Deutschland verortet. Für die Kostenanalyse werden weder Subventionen noch Strafzahlungen angenommen, da deren langfristige Entwicklung unklar ist. Dasselbe gilt für Mautgebühren, Umsatz-, Zulassungssteuer und die Befreiung von der Kraftfahrzeugsteuer für Elektrofahrzeuge, welche längstens bis 2030 gilt (§ 3d des Kraftfahrzeugsteuergesetzes, KraftStG).
- Im Basisfall der Analyse werden keine Steuervorteile berücksichtigt, in einer Sensitivitätsanalyse aber deren Einsparpotenzial aufgezeigt.
- Gemeinkosten umfassen z. B. Kosten für die Miete, Umschlagprozesse in der Logistik, Disposition und das Management. Diese Gemeinkosten werden für alle Fahrzeugalternativen als weitgehend gleich angenommen und deshalb in der Analyse nicht berücksichtigt.
- Ein teleoperierter Betrieb der Fahrzeuge ist nicht vorgesehen.

⁴⁵ analog zur potenziellen Marktentwicklung von Elektrofahrzeugen: Fußnote ⁵⁷ in Anhang J.

Tabelle 5.19 umfasst die **relevanten Parameter für die Kostenanalyse**, weitere Kenngrößen sind in Tabelle 5.17 und Tabelle 5.18 enthalten.

Tabelle 5.19: Übersicht der Input-Parameter für die RCO-Analyse		
Werte für die untersuchten Fahrzeugkonzepte Van, RoboVan und U-Shift in der Referenzanwendung S-Vaihingen für das Jahr 2040; Abkürzungen: Fahreinheit bzw. Fahrzeug (FE), Transporteinheit (TE)		
Parameter	Wert	Quelle
Kalkulationszinsfuß	5 %	[37, 213, 214]
Unternehmenssteuersatz	30 %	[230]
Haltedauer FE Ladesäulen	6 15 Jahre	[37, 214, 407]
Haltedauer TE	≙ Lebensende	Begründung: S. 138; Werte: Tabelle 5.17
RPE	1,45	Kapitel 4.3
Versicherungssatz für FE (assistiert) FE (fahrerlos) TE	1,5 % 0,9 % 0,5 %	Kapitel 4.3
Bruttoverdienst im Personentransport Gütertransport Paketdienst	25 20 25 EUR ₂₀₂₀ /h	[405, 406]
Lohnnebenkosten	23,3 %	[232]
Strompreis	220 EUR ₂₀₂₀ /MWh	[240]
Batteriekosten (Batteriepack)	80 EUR ₂₀₂₀ /kWh	[214, 241, 251, 252]
Betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer (Afa) für FE TE Ladesäulen	6 6 6 Jahre	[231, 408]
Anschaffungskosten 22 kW 43 kW Ladesäule	3.270 6.490 EUR ₂₀₂₀	abgeleitet aus [37]
Laufende Kosten Ladesäule	1.350 EUR ₂₀₂₀ p. a.	abgeleitet aus [37]
Instandhaltungskosten für FE ⁴⁶	3,33 EUR ₂₀₂₀ /100 km	[37], Kapitel 4.3
Reinigungskosten von FE und TE im Personentransport: manueller fahrerloser Fahrbetrieb	3 6 EUR ₂₀₂₀ /100 km	[39, 255]
Kfz-Steuer für FE	104,48 EUR ₂₀₂₀ p. a.	Kapitel 4.3

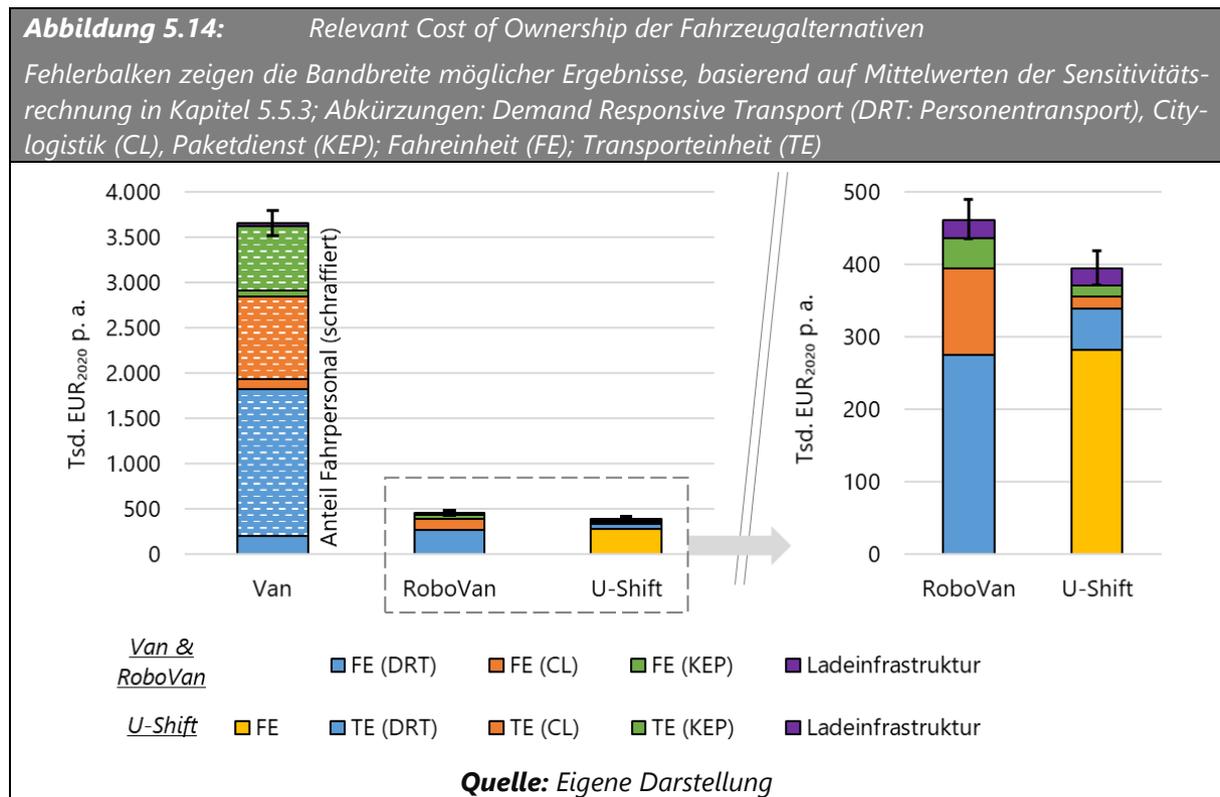
Quelle: Eigene Zusammenstellung mit Herleitung der Werte in Kapitel 4.3 und 5.5.1

5.5.2 Ergebnisse der Kostenanalyse

Anhand der definierten Eingangsgrößen werden die Van-, RoboVan- und U-Shift-Flotte für die Referenzanwendung S-Vaihingen hinsichtlich ihrer relevanten Gesamtkosten

⁴⁶ Bei U-Shift wird für Personen-Transporteinheiten angenommen, dass deren Instandhaltungskosten in denen der Fahreinheiten enthalten sind, da die Instandhaltungskosten für integrale Fahrzeuge ermittelt wurden. Für die deutlich wartungsärmeren Güter-Transporteinheiten wird angenommen, dass die Instandhaltungskosten vernachlässigbar sind.

analysiert. In Abbildung 5.14 ist das nach Formel (4.9) berechnete Ergebnis der RCO-Analyse dargestellt, bei dem die Anschaffungskosten, laufenden Kosten und Restwerte für alle Flotteneinheiten sowie der Ladeinfrastruktur berücksichtigt werden. Diese werden anhand ihrer Haltedauer (Tabelle 5.19) und ihrer benötigten Anzahl in der Flotte (Tabelle 5.17) zu den **systemischen Kosten der Fahrzeugkonzeptalternativen** aggregiert. Das Ergebnis bezieht sich auf die Annahmen im Basisfall (Tabelle 5.19), ergänzt um eine Bandbreite möglicher Ergebnisse.



Die beiden fahrerlosen Systemalternativen RoboVan und U-Shift verursachen signifikant weniger systemische Kosten p. a. als die Van-Alternative (ca. 90 %), da keine **Kosten für das Fahrpersonal** anfallen. Bei der Einführung von fahrerlosen Fahrzeugen besteht damit ein großes Potenzial die Fahrtkosten zu senken. Die Zusammensetzung der Kosten sowie der hohe Personalkostenanteil bei der Van-Flotte werden im Rahmen von Abbildung 5.15 erörtert. In Abbildung 5.14 werden nur die Kosten für den Fahrbetrieb berücksichtigt. In einer Summen-Betrachtung einschließlich der Gemeinkosten, unter anderem für Lagerung und Umschlag, die entsprechend einer Studie von Fraunhofer

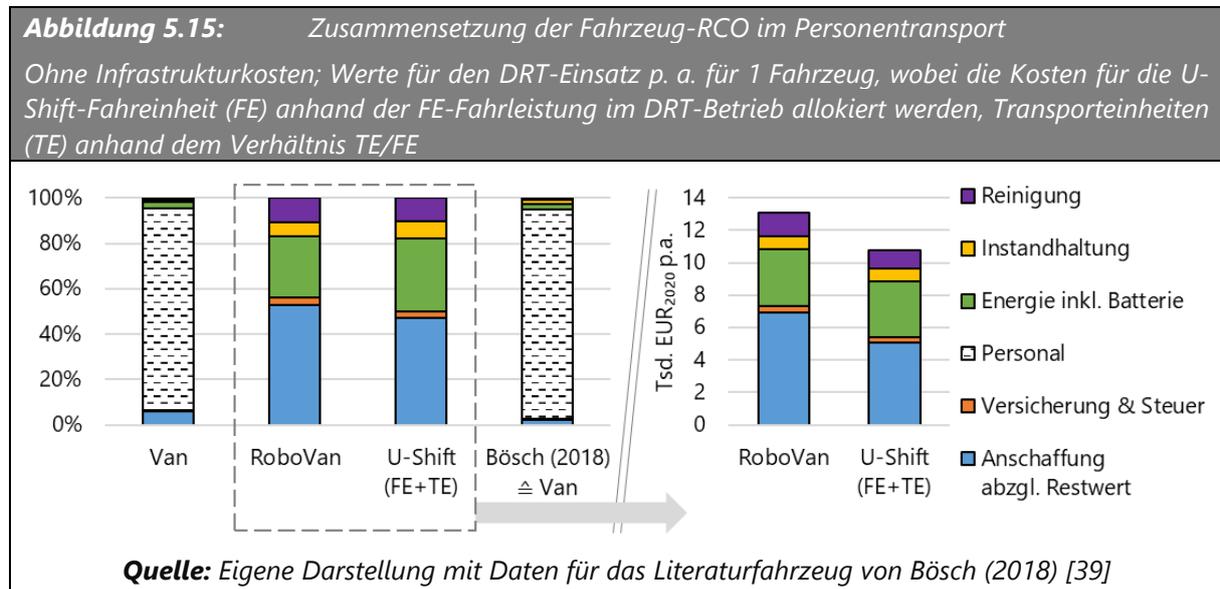
54 % (fhg) betragen [137], verbleibt gemäß der Formel $(1 - fhg) (RCO_{sys,RV}^a - RCO_{sys,V}^a) / RCO_{sys,V}^a$ weiterhin eine Kostenersparnis durch die Automatisierung von RoboVan gegenüber Van von ca. 40 % (ca. 50 % in einer PwC-Studie [218]).

Der **Personentransport** verursacht den höchsten Kostenanteil sowohl bei Van als auch bei RoboVan und den U-Shift-Transporteinheiten. Mit je 21 Fahrzeugen für den Personentransport in den Van- und RoboVan-Flotten, ist die Anzahl der Personenfahrzeuge höher als die der KEP- oder Citylogistikfahrzeuge und zudem auch teurer in der Anschaffung als diese. Des Weiteren entstehen im Van-Einsatzszenario ca. 50 % der Betriebsstunden durch den Personentransport, weshalb die Kosten p. a. für das Fahrpersonal im Personentransport höher sind als im Citylogistik- oder Paketsegment. Bei der U-Shift-Flotte verursachen die Fahreinheiten die meisten Kosten, gefolgt von den Personen-Transporteinheiten.

Ein RoboVan-Fahrzeug ist je nach Einsatzzweck um ca. 10–30 % günstiger in der Anschaffung als ein U-Shift-Pendant (Tabelle 5.18). In der systemischen Betrachtung auf **Flottenebene** p. a. reduzieren sich die Kosten für U-Shift hingegen. Mit um 5–10 % geringeren Kosten für Ladeinfrastruktur und laufenden Kosten p. a. ergibt sich ein Kostenvorteil von U-Shift gegenüber RoboVan um insgesamt 15 %: ca. 400 Tsd. EUR₂₀₂₀ p. a. (U-Shift) gegenüber ca. 460 Tsd. EUR₂₀₂₀ p. a. (RoboVan). Erste Arbeiten zur Tourenoptimierung von modularen Fahrzeugkonzepten inklusive Kostenabschätzungen ergeben ebenfalls Kostenvorteile für diese gegenüber fahrerlosen, integralen Fahrzeugen: je nach Studie ca. 5–25 % [13, 33].

Nach der Untersuchung der systemischen RCO p. a. wird die **Kostenzusammensetzung** für Fahrzeuge im Personen- und Gütertransport analysiert: In Abbildung 5.15 sind die Kosten für Personenfahrzeuge dargestellt (ohne Ladeinfrastruktur), wobei für U-

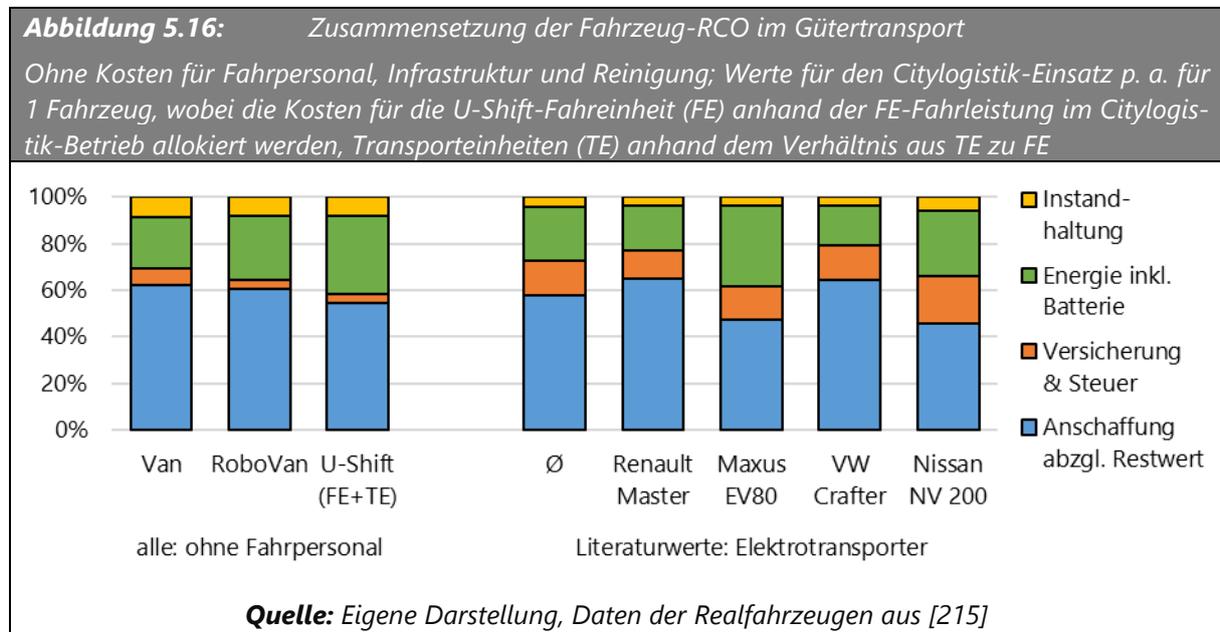
Shift die Kombination aus einer Fahreinheit, allokiert nach ihrer Fahrleistung im DRT-Betrieb, und einer Personen-Transporteinheit angenommen wird.



Bei Van-Fahrzeugen verursacht das **Fahrpersonal** den größten Kostenanteil mit knapp 90 % (pka_V), wie auch in der Literatur durch Bösch (2018) ermittelt [39], wobei jeweils nur die Kosten für den Transportbetrieb berücksichtigt werden. Bezogen auf die systemischen Gesamtkosten und bei der Annahme von Gemeinkosten wird entsprechend der Herleitung auf S. 142 und der Formel $pka_V (1 - fhg)$ ein Kostenanteil des Fahrpersonals von ca. 40 % ermittelt. In der Literatur werden entsprechende Kostenanteile zwischen 36 % [409] und 55 % [410] für das Gütersegment angegeben.

Aufgrund gleicher Fahrleistungen im DRT-Betrieb von **RoboVan und U-Shift** sind die absoluten laufenden Kosten nahezu identisch. Entsprechend der Methodik in Kapitel 4.3 werden die RCO zunächst für die Haltedauer unter Berücksichtigung der Diskontierung berechnet und anschließend auf ein Jahr bezogen. Die U-Shift-Transporteinheit hat eine längere Haltedauer als die Fahreinheit, weshalb sich die Reinigungskosten trotz gleicher jährlicher Fahrleistung von einem Betrieb mit RoboVan unterscheiden. Die systemischen Anschaffungskosten p. a. sind für U-Shift geringer, da die Fahreinheit nur anteilig entsprechend ihrer Fahrleistung allokiert wird und die Transporteinheiten eine längere Haltedauer besitzen.

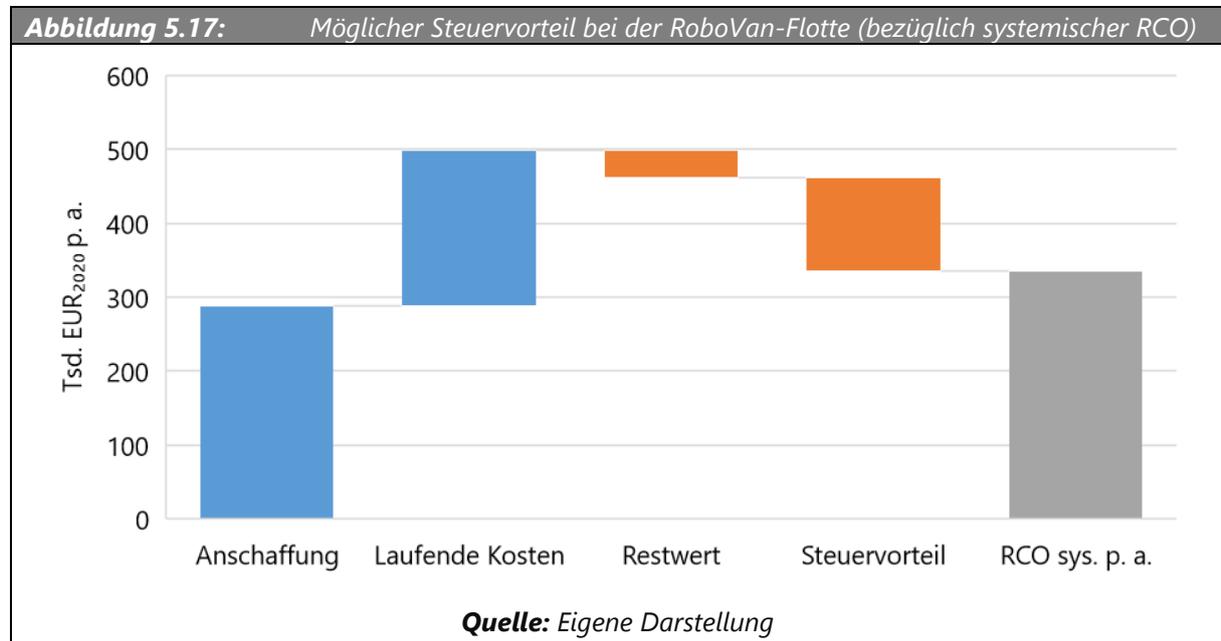
Im Vergleich für Fahrzeuge im Güterverkehr stellt Abbildung 5.16 die Kostenzusammensetzung ohne Kosten für Fahrpersonal oder Infrastruktur dar. Dadurch lassen sich die Van-Fahrzeuge mit Realfahrzeugen aus dem Status quo (Literaturwerte) vergleichen.



Die größten Kostenanteile sind für alle Fahrzeuge die Anschaffung und die Energiekosten inklusive Batterie. Die Mittelwerte der **Status quo-Elektrotransporter** [215] stimmen mit dem Van-Fahrzeug weitgehend überein. Die modellierten Versicherungskosten liegen geringfügig unter, die Instandhaltungskosten über den Literaturwerten. Aufgrund der Streuung der Literaturwerte bezüglich Herstell- und Energiekosten wird eine Sensitivitätsanalyse dieser Kostenanteile im folgenden Kapitel durchgeführt.

In den Randbedingungen der RCO-Analyse (Kapitel 5.5.1) wurde definiert, keinen **Steuervorteil** zu berücksichtigen, da die Erlösseite in dem RCO-Modell nicht betrachtet wird. Unter der Annahme ausreichend hoher Erlöse wird der Steuervorteil für die RoboVan-Systemalternative nach Formel (4.13) berechnet und in Abbildung 5.17 dargestellt. Der Steuervorteil über ca. 125.000 EUR₂₀₂₀ entspricht dabei in etwa dem

angenommenen Unternehmenssteuersatz von 30 %. Der Steuervorteil für die beiden anderen Fahrzeugalternativen ist prozentual ähnlich hoch, absolut ist er bei Van jedoch größer, da hier die hohen Personalkosten angerechnet werden können.



5.5.3 Sensitivitätsanalyse und Break-Even-Betrachtungen

In Kapitel 4.3.4 wurden die Parameter festgelegt, die in einer Sensitivitätsanalyse untersucht werden sollen. In Tabelle 5.20 wird die Veränderung der systemischen RCO p. a. bei Variation der Parameter relativ zum Basisfall (Abbildung 5.14) angegeben.

Tabelle 5.20: Ergebnis der RCO-Sensitivitätsanalyse (Veränderung der systemischen RCO p. a.)

Angaben für Van, RoboVan und U-Shift im Vergleich zum Basisfall (Abbildung 5.14); die Ausgangswerte der Eingangsparameter im Basisfall wurden, wenn nicht anders angegeben, in Kapitel 4.3 hergeleitet oder in Tabelle 5.18 oder Tabelle 5.19 spezifiziert; *eine Änderung des Energieverbrauchs resultiert in einer geänderten Batteriekapazität; #Fahrleistung der Fahrereinheiten (FE) während deren Haltedauer; #nur Citylogistik- und KEP-Transporteinheiten werden variiert, da für DRT-TE eine 1:1 Beziehung zu den FE besteht

Parameter	Basisfall	Variation	Van 	RoboVan 	U-Shift 
Kalkulationszinsfuß	5 %	±25 %	[±4 %]	[±1 %]	[±2,5 %]
Strompreis	220 EUR ₂₀₂₀ /MWh	±25 %	[±0 %]	[±5 %]	[±6 %]
Herstellkosten	Tabelle 5.18	±25 %	[±2 %]	[±14 %]	[±13 %]
Lohnkosten	Tabelle 5.19	±25 %	[±22 %]	[±0 %]	[±0 %]
Energieverbrauch*	Tabelle 5.17	±25 %	[±1 %]	[±6 %]	[±7,5 %]
Batteriepreis	80 EUR ₂₀₂₀ /kWh	±25 %	[±0 %]	[±1 %]	[±2 %]
Batterielebensdauer	200.000 km	±25 %	[±0 %]	[±1,5 %]	[±1,5 %]
		$FL_{FE}(H_{FE})^{\#}$	0 %	-2 %	-3 %
Haltedauer	Tabelle 5.19	±25 %	[+5 %; -4 %]	[+14 %; -10 %]	[+14 %; -11 %]
Fahrleistung	Tabelle 5.17	±25 %	[±1 %]	[±12,5 %]	[±12 %]
Verhältnis Transporteinheit zu FE [#]	Tabelle 5.17	±25 %	n. a.	n. a.	[±2 %]

Quelle: Eigene Zusammenstellung

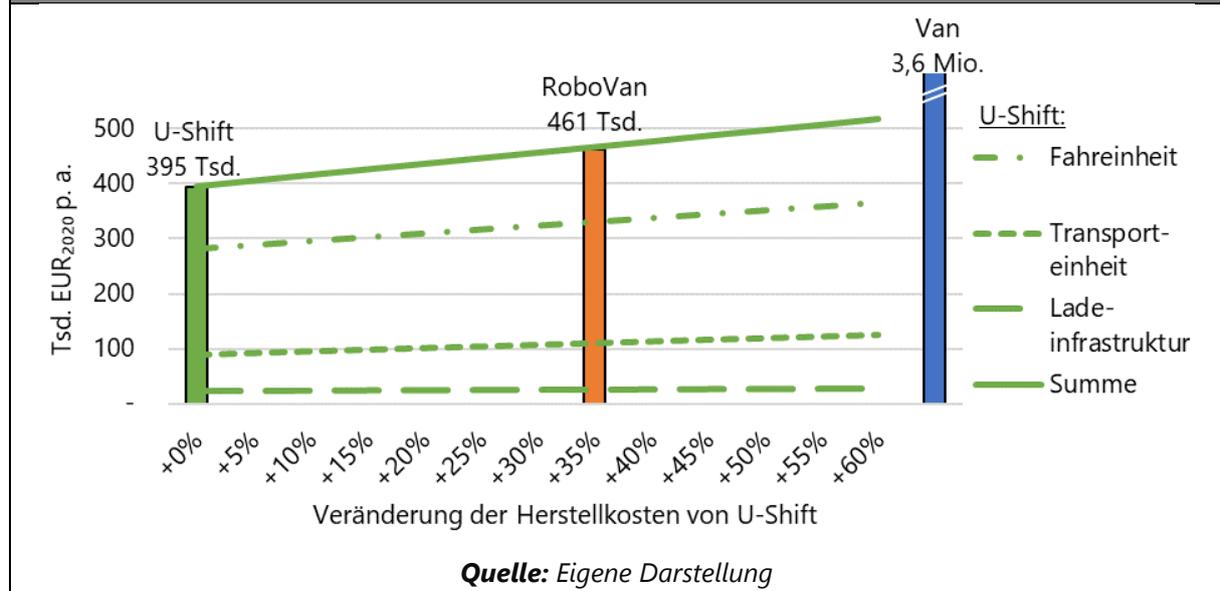
Die RCO p. a. der Van-Flotte werden maßgeblich von den Personalkosten beeinflusst und reagieren entsprechend sensitiv auf eine Änderung derselben. Die RoboVan- und U-Shift-Flotte werden dagegen vor allem durch die Herstellkosten, die Haltedauer und die Fahrleistung beeinflusst und reagieren weitestgehend gleich auf Änderungen dieser Parameter. Für die drei besonders sensitiven Parameter werden Break-Even-Analysen durchgeführt, wobei die fahrerlosen Fahrzeuge in allen Annahmen unter den Kosten der Van-Flotte liegen.

Eine **Break-Even-Analyse** zu Herstellkosten ist in Abbildung 5.18 dargestellt. Erst ab 35 % höheren Herstellkosten der U-Shift-Fahr- (FE) und Transporteinheiten (TE) verursacht die RoboVan-Flotte in Summe weniger RCO p. a. als U-Shift. Ähnlich verhält sich

eine Variation der Fahrleistung, bei welcher der Break-Even ebenfalls bei 35 % erreicht wird, bezogen auf eine Erhöhung der Fahrleistung von U-Shift.

Abbildung 5.18: Break-Even-Analyse zu Herstellkosten (systemische RCO p. a.)

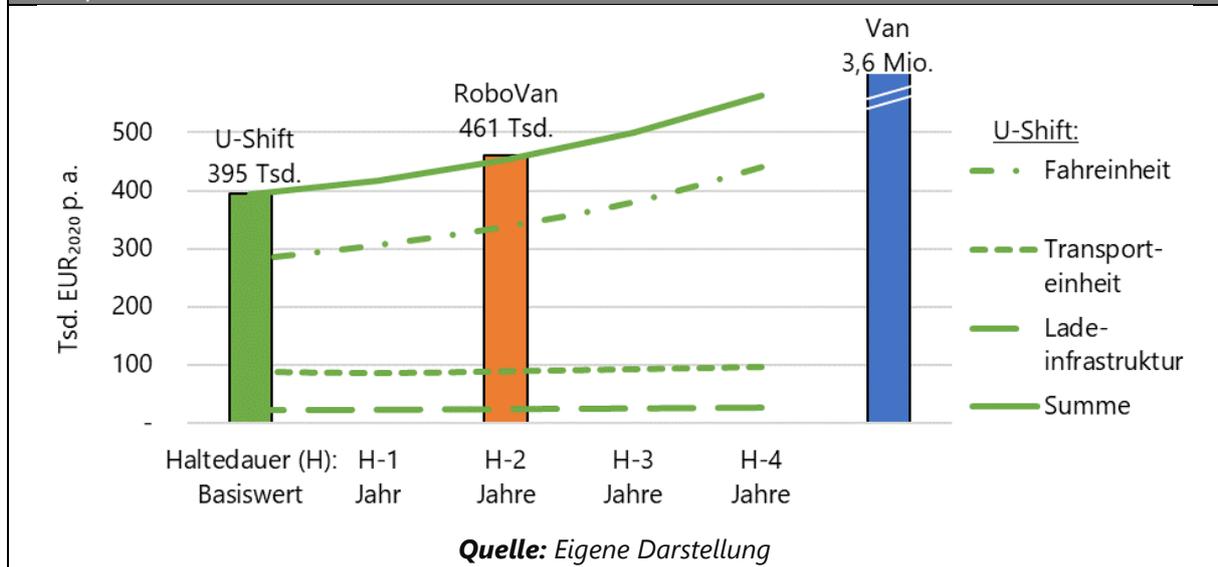
Die Herstellkosten der U-Shift-Fahr- und Transporteinheiten werden verändert; die Säulen stellen die Basiswerte der Fahrzeugalternativen dar (keine Parametervariation); die grüne, durchgezogene Linie ist die Projektion der systemischen RCO p. a. von U-Shift bei einer Variation der Herstellkosten; ab dem Schnittpunkt der Linie mit der RoboVan-Säule, sind die systemischen RCO p. a. von U-Shift höher als die von RoboVan



Die Haltedauer wirkt sich entsprechend Formel (4.11) exponentiell auf die RCO aus, wie in Abbildung 5.19 dargestellt. Bei einer um 2 Jahren geringeren Haltedauer ist der Break-Even mit dem RCO der RoboVan-Flotte erreicht.

Abbildung 5.19: Break-Even-Analyse zur Haltedauer (systemische RCO p. a.)

Die Haltedauer der U-Shift-Fahr- und Transporteinheiten sowie der Ladeinfrastruktur wird verändert; die Säulen stellen die Basiswerte der Fahrzeugalternativen dar (keine Parametervariation); die grüne, durchgezogene Linie ist die Projektion der systemischen RCO p. a. von U-Shift bei einer Variation der Haltedauer; ab dem Schnittpunkt der Linie mit der RoboVan-Säule, sind die systemischen RCO p. a. von U-Shift höher als die von RoboVan



Charakteristisch für das on-the-road modulare U-Shift-Konzept ist die höhere Anzahl der Transporteinheiten (TE) gegenüber den Fahreinheiten (FE). Eine Erhöhung der Anzahl der TE für Citylogistik und KEP hat nur einen geringen Einfluss auf die systemischen RCO p. a. des U-Shift-Betriebs (Tabelle 5.20, die DRT-TE werden nicht variiert, da ein 1:1-Verhältnis zwischen diesen und den FE besteht). Erst ab einer Verdreifachung der TE (Citylogistik und KEP) ergibt sich ein Break-Even mit der RoboVan-Flotte.

5.5.4 Zusammenfassung und Diskussion der Erkenntnisse

Ein Modell zur Berechnung der Relevant Cost of Ownership (RCO) on-the-road integraler und modularer Fahrzeugkonzepte wurde entwickelt und auf die Fahrzeugkonzepte Van (Status quo), RoboVan (fahrerloser Status quo) und U-Shift (on-the-road modular) angewendet.

Methodisch wichtig ist eine Flottenbetrachtung im jeweiligen Einsatzszenario, da eine U-Shift-Flotte aus verschiedenen Fahr- und Transporteinheiten besteht, während beim Status quo Fahreinheiten zugleich Transporteinheiten sind. Die U-Shift-Fahreinheiten

werden in verschiedenen Einsatzzwecken der Anwendung genutzt, weshalb deren Kosten z. B. anhand der Fahrleistung oder Einsatzzeit allokiert werden müssen.

Zudem haben die Fahr- und Transporteinheiten sowie Traktionsbatterien und Infrastruktureinheiten sowohl bei den integralen als auch bei den modularen Fahrzeugalternativen unterschiedliche Lebensdauern (zum Teil kalendarisch, zum Teil abhängig von der ebenfalls unterschiedlichen Jahresfahrleistung). Daher werden für eine vergleichende Bewertung die systemischen RCO p. a. berechnet.

Die Ergebnisse der durchgeführten RCO-Analyse sind für die untersuchten Fahrzeugkonzepte Van, RoboVan und U-Shift in der Referenzanwendung S-Vaihingen (Kapitel 5.3) unter den Annahmen in Kapitel 5.5.1 gültig.

Der größte Kostentreiber im Van-Betrieb ist das **Fahrpersonal**, welches nahezu 90 % der RCO p. a. verursacht (übereinstimmend mit Bösch (2018) [39]). Es wurden nur transportbezogene Kosten sowie die der Ladeinfrastruktur berücksichtigt. Bei Hinzunahme der Gemeinkosten sinkt der Personalanteil, bleibt aber weiterhin dominierend. Fahrerlose Systeme wie RoboVan und U-Shift benötigen kein Fahrpersonal und sind somit erwartungsgemäß kostengünstiger [39, 218]. Die Automatisierung geht mit erhöhten Herstell- und Betriebskosten einher, die Gesamtkosten bleiben aber signifikant niedriger, wobei mögliche volkswirtschaftliche Kosten für den Infrastrukturausbau (Netzabdeckung, Navigationssatelliten etc.) nicht in die Kostenanalyse eingegangen sind. Neben diesen Kostenvorteilen wirken fahrerlose Fahrzeuge dem Fachkräftemangel im Personen- und Güterwirtschaftsverkehr entgegen [9, 11, 107].

Die **Herstellkosten** sind bei U-Shift durch die Modularisierung höher als bei vergleichbaren integralen Fahrzeugalternativen. Diese höheren Investitionskosten werden durch Flotteneffekte sowie längere Nutzungsdauer der Transporteinheiten wieder kompensiert und führen letztendlich zu geringeren systemischen RCO p. a. als bei RoboVan oder Van.

Im **Personentransport** wurde eine 1:1-Beziehung zwischen U-Shift-Fahr- und Transporteinheit unterstellt, da mehr Transport- als Fahreinheiten im Personenverkehr nicht sinnvoll sind. Ein Anwendungsfall, der nur aus Personentransport besteht würde aufgrund der höheren Herstellkosten in höheren Kosten für modulare Systeme resultieren. Durch die zusätzliche Nutzung der kostenintensiven Fahreinheiten in den beiden anderen Segmenten der Referenzanwendung, Citylogistik und KEP, werden deren Kosten auf die Segmente verteilt. Der Einsatz modularer Systeme im kombinierten Transport von Personen und Gütern ist damit sinnvoll und anzustreben.

In einer **Parametervariation** ändert sich die Präferenzrelation nicht, wobei U-Shift und RoboVan die geringsten RCO p. a. verursachen. Die Van-Flotte reagiert vor allem auf Personalkosten sensibel, während Herstellkosten, Haltedauer und Fahrleistung U-Shift und RoboVan am stärksten beeinflussen. Eine höhere Anzahl von Transporteinheiten für den Güter- bzw. Pakettransport verändert die RCO p. a. von U-Shift nur marginal, da teure Fahreinheiten mit kostengünstigen Transporteinheiten kombiniert werden.

Für künftige Arbeiten werden folgende ergänzende Forschungsaktivitäten empfohlen.

Angaben zu möglichen **Erlösen** liegen bislang nicht vor, sollten aber ebenfalls in die vergleichende Bewertung einbezogen werden. Diese sind für die Berechnung der **Amortisationsdauer** erforderlich, welche für Fahrzeugbetreiber bei Investitionsentscheidungen wichtig ist und vorwiegend nach 2 Jahren erreicht werden sollte [411]. Über Nutzerakzeptanzstudien und Umfragen zur Zahlungsbereitschaft könnten die Erlöspotenziale ermittelt werden. Z. B. erfolgt die Paketzustellung bei Van in üblicher Haustürzustellung, bei RoboVan mit mobilen und bei U-Shift mit quasi-stationären Paketstationen (Kapitel 4.1). Möglicherweise müssten die Preise für Paketsendungen verringert werden, wenn die komfortable Haustürzustellung entfällt.

Das erarbeitete RCO-Modell muss immer auf das jeweilig zu bewertende **Einsatzszenario** angewendet werden, wobei simulativ optimierte Einsatzszenarien die Qualität der Eingangsdaten (vgl. Kapitel 4.1) und damit der Ergebnisse erhöhen können.

Lebenszyklusanalysen könnten weitere Kostentreiber, z. B. in Produktion und Verwertung, identifizieren [209, 210]. Zudem können externe Kosten und Nutzen, wie eine potenzielle erhöhte Verkehrssicherheit durch automatisierte Fahrzeuge, für eine volkswirtschaftliche Berechnung inkludiert werden [32, 35, 210, 412].

5.6 Auswertung der Ökobilanzierung

Die Umweltwirkungen der Van-, RoboVan- und U-Shift-Fahrzeugkonzeptalternativen werden in diesem Kapitel anhand des in Kapitel 4.4 erarbeiteten Ökobilanz-Modells für die Referenzanwendung S-Vaihingen (Kapitel 5.3) vergleichend bewertet. Die Fahrzeugauswahl wurde in Kapitel 5.2 abgeleitet und in Kapitel 5.4 spezifiziert.

5.6.1 Sachbilanzen und Stoffströme ausgewählter Fahrzeugalternativen

Die Fahrzeugkonzepte **Van und RoboVan** werden für die Ökobilanzierung (LCA) auf dieselbe Weise modelliert. Die Grundlage bilden Fahrzeuge aus dem ecoinvent-Datensatz (Abschnitt 4.4.4), die auf die jeweiligen Fahrzeugmassen skaliert werden. Entsprechend des Untersuchungsrahmens (Kapitel 4.4.3) werden alle die Wartung betreffenden Prozesse aus dem Datensatz entfernt, da die Wartung bei U-Shift aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt werden kann. Dies betrifft nicht den Wechsel von Traktionsbatterien, die aufgrund ihrer kürzeren Laufzeiten während der Nutzungsphase der Fahrzeuge ersetzt werden müssen und einen signifikanten Einfluss auf die LCA haben [263, 265]. Emissionen durch Wartungsprozesse haben einen geringen Anteil an den Gesamtemissionen: z. B. 3 % der Treibhausgase von Elektrofahrzeugen [279]. Die Sachbilanz wird um Produktions- und Entsorgungsprozesse für Automatisierungskomponenten ergänzt, welche aus ecoinvent-Datensätzen für Kamera, Radar etc. entsprechend des fahrzeugspezifischen Sensorsetups (Kapitel 5.4) gebildet werden.

Eine **U-Shift**-Fahreinheit wird aus den Teilkomponenten Antriebsstrang, Beleuchtung, Lack, Rohbau, Thermomanagement, Steuergeräte und Sensorset modelliert. Die Traktionsbatterie wird als gesondertes Modul in den Stoffstrom aufgenommen, da für diese eine andere Lebensdauer als für Fahreinheiten angenommen wird [263, 283]. Die Summe aus Antriebsstrang und Traktionsbatterie stellt mit ca. 60 % der Masse den größten Gewichtsanteil der Fahreinheit dar. Für Transporteinheiten in der Personenbeförderung werden die folgenden Komponenten in der Stoffstrommodellierung berücksichtigt: Beleuchtung, Interieur, Lack, Leistungselektronik, Rohbau (ca. 50 % der Masse), Sensorset und Thermomanagement. Die Modellierung erfolgt mit Primärdaten des U-Shift-Entwicklungsteams, wobei für Standardprozesse, wie Stahl- und Kabelproduktion, Metallverarbeitung, Lackierung und Endmontage,ecoinvent-Daten verwendet werden.

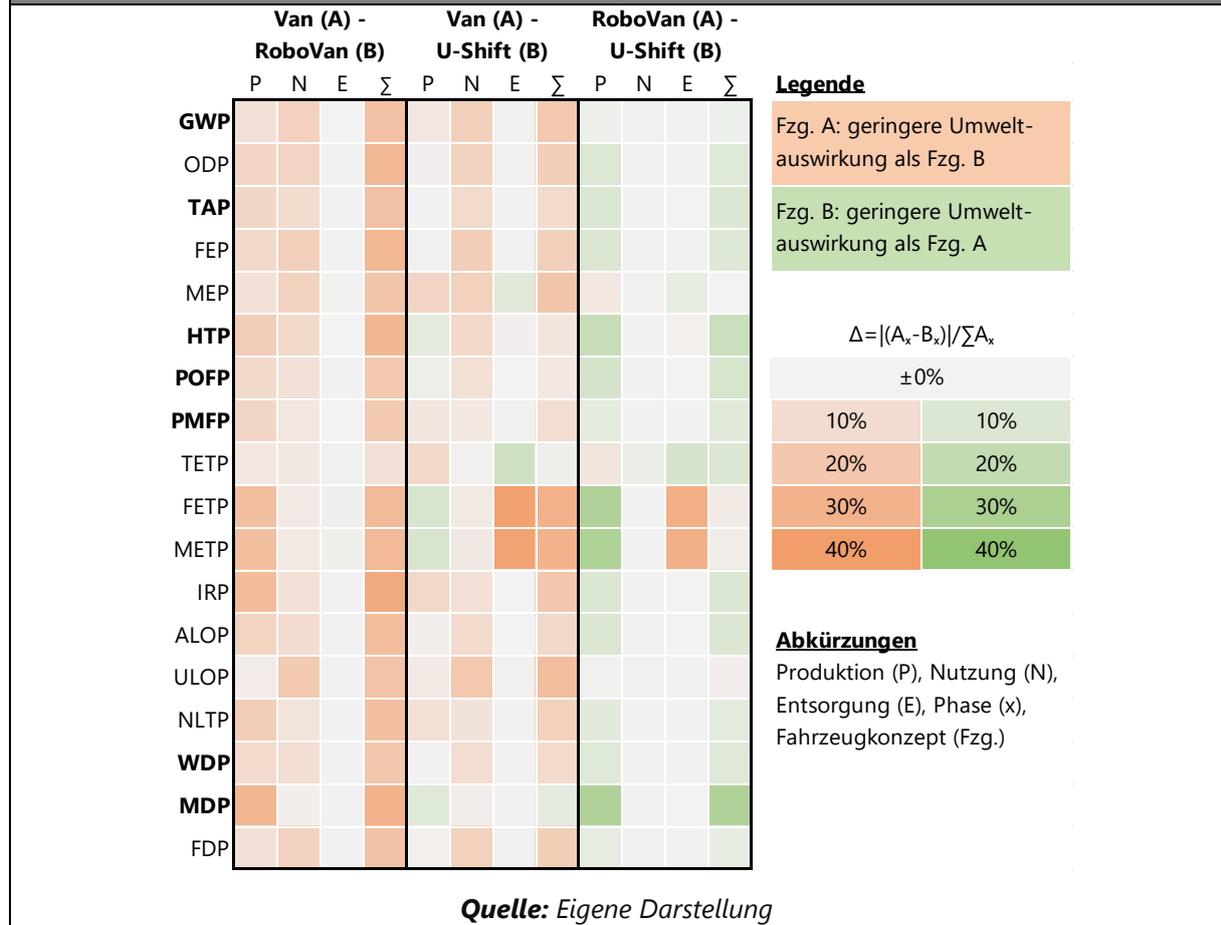
Die technische Spezifikation der Fahrzeugalternativen in Kapitel 5.4, die Einsatzszenarien (Kapitel 5.3) und die Herleitungen für die Ökobilanzierung (Kapitel 4.4) stellen die wesentlichen Eingangsparameter für das Ökobilanz-Modell dar. Der visionäre Bezug der Einsatzszenarien (Jahr 2040) wird zum einen über einen Strommix mit 70 % Anteil erneuerbarer Energieträger (ca. 50 % in 2020, Abbildung 4.8) und zum anderen über Lernkurvenansätze berücksichtigt. Für Verbesserungen unter anderem bei der Materialzusammensetzung, in der Produktionstechnologie oder in der Gewinnung von Rohstoffen, werden Entwicklungsfaktoren für die Fahrzeugkonzepte bzw. deren Teilkomponenten definiert: 0,5 % p. a. für Van und RoboVan als auf Status quo-Fahrzeugen basierende Konzepte und 2 % p. a. für U-Shift, da sich U-Shift in einem frühen Entwicklungsstadium befindet und für modulare Produkte in der Vergangenheit höhere Lernraten ermittelt wurden [211]. Für die Automatisierungskomponenten der Fahrzeugalternativen werden 3 % p. a. angenommen. In einer Parametervariation werden als zukunftsweisendes Szenario mit potenziell höheren Lernraten bei der Automatisierung und der Fertigung neuartiger Fahrzeuge Entwicklungsfaktoren von 5 % p. a. für die Automatisierung, 3 % p. a. für die U-Shift- und 1 % p. a. für die RoboVan-Flotte angenommen. In einem konservativen Szenario wird der Entwicklungsfaktor des U-Shifts auf 1 %

p. a. reduziert. Anhand von Literaturwerten werden die angenommenen Entwicklungsfaktoren auf ihr Plausibilität überprüft.

5.6.2 Ergebnisse für die ReCiPe-Wirkkategorien

Die Wirkungsabschätzung, ein zentraler Schritt der LCA gemäß Kapitel 4.4 bzw. DIN EN ISO 14040, erfolgt mit der Auswertung der Ergebnisse in diesem Kapitel. Abbildung 5.20 zeigt die Umweltwirkungen der Fahrzeugkonzeptalternativen Van, RoboVan und U-Shift in der Referenzanwendung S-Vaihingen für alle Wirkkategorien der ReCiPe-Methode mit Annahmen des Basisfalls.

Abbildung 5.20: Umweltwirkung im direkten Vergleich der Fahrzeugkonzepte
 Die Wirkkategorien werden durch ihre Indikatoren repräsentiert und sind in Tabelle K.1 erläutert; hervorgehobene Wirkkategorien werden im Folgenden detailliert untersucht; die prozentualen Unterschiede zwischen den Alternativen werden anhand der Gesamtemissionen des jeweiligen Vergleichsfahrzeugs berechnet



Abkürzungen
 Produktion (P), Nutzung (N),
 Entsorgung (E), Phase (x),
 Fahrzeugkonzept (Fzg.)

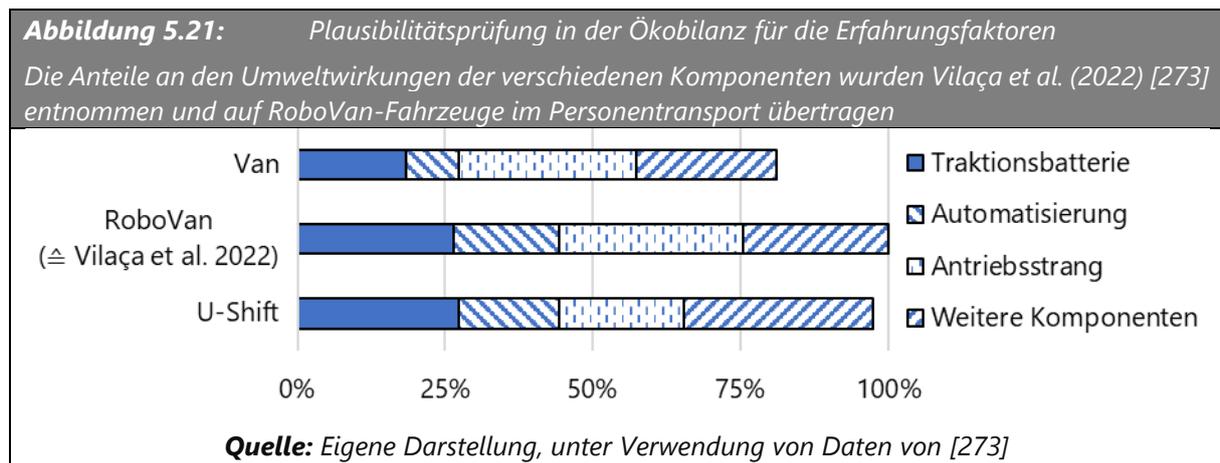
Im direkten **Vergleich von Van und RoboVan** hat die Van-Flotte im untersuchten Einsatzszenario für die meisten Wirkkategorien ca. 20 % geringere Umweltwirkungen. Die Gründe dafür liegen zum einen darin, dass in der Nutzungsphase der Energiebedarf durch die Automatisierung steigt und die um ca. 10 % geringere Fahrleistung diesen Mehrbedarf nicht kompensieren kann. Zum anderen verursachen zusätzlich benötigte Automatisierungskomponenten höhere Umweltwirkungen in der Produktionsphase.

Im **Vergleich der Van- mit der U-Shift-Flotte** liegen die Emissionen in der Produktions- und Entsorgungsphase nahe beieinander. Die um ca. 60 % geringere Anzahl von Fahreinheiten bei U-Shift können den Mehraufwand in der Produktion durch die Automatisierungskomponenten und die Modularisierung teilweise kompensieren. Die Transporteinheiten verursachen aufgrund ihrer längeren Lebensdauer anteilig geringe Emissionen in der Produktion. In der Nutzungsphase ergeben sich ähnliche Unterschiede wie zwischen Van und RoboVan.

Eine nahezu identische Flottenfahrleistung der **U-Shift- und RoboVan-Flotte** ($\Delta 3\%$) resultiert in einer ähnlich hohen Umweltwirkung in der Nutzungsphase. U-Shift hat je nach gekoppelter Transporteinheit einen geringeren oder höheren Energieverbrauch als RoboVan; die Unterschiede gleichen sich für die meisten Wirkkategorien aus. Durch die geringere Anzahl der Fahreinheiten gegenüber RoboVan, weist U-Shift in 15 Wirkkategorien geringere Umweltwirkungen in der Produktionsphase auf. Die Umweltwirkungen durch die U-Shift-Flotte sind in der Summe aller Lebensphasen für 12 der 18 Wirkkategorien um ca. 5 % geringer als bei RoboVan.

Im Vergleich mit einer Studie von Vilaça et al. (2022), die die Ökobilanz von fahrerlosen, elektrischen Ridesharing-Fahrzeugen untersucht haben [273], werden die Ergebnisse für die angenommenen **Erfahrungsfaktoren** auf Plausibilität geprüft. Aus der Studie ergibt sich, dass im Mittel über alle ReCiPe-Wirkkategorien hinweg, die Traktionsbatterie 28 %, die Automatisierungskomponenten 17 % und der Antriebsstrang 30 % der

Umweltwirkungen verursachen. Die Werte werden auf das RoboVan-Fahrzeug für den Personentransport übertragen, da dieses dem Fahrzeug der Studie näherungsweise entspricht. Durch eine Skalierung können die Studienwerte auf die Fahr- und Transporteinheiten der Van- und U-Shift-Flotte übertragen werden. Die Ergebnisse berücksichtigen die Flottengröße und die Lebensdauer der Fahrzeuge. Bei Van-Fahrzeugen werden die Automatisierungskomponenten nur anteilig berücksichtigt, da für fahrerloses Fahren mehr Sensoren benötigt werden als bei assistierten Fahrzeugen. Bei U-Shift-Transporteinheiten entfallen die Anteile für den Antriebsstrang und teilweise auch für Automatisierung und Batterien. Die Auswertung in Abbildung 5.21 zeigt, dass Van um ca. 19 % geringere Umweltwirkungen im Mittel über alle Wirkkategorien ergeben sollte als RoboVan und 17 % weniger als U-Shift.



U-Shift und RoboVan erreichen in der Plausibilitätsprüfung mit ca. -3 % ähnliche Werte, wobei die U-Shift-Transporteinheiten den Anteil der übrigen Komponenten (Karosserie etc.) erhöhen und gleichzeitig den Anteil insbesondere des Antriebsstrangs reduzieren. Im Vergleich mit den Ergebnissen aus Abbildung 5.20 stimmt der Trend, dass Van geringere Umweltwirkungen aufweist als die anderen Fahrzeugalternativen. U-Shift hat in der Modell-Berechnung mit den Entwicklungsfaktoren ca. 10 % geringere Umweltwirkungen als RoboVan und damit etwas geringere Auswirkungen als bei der Skalierung nach Vilaça et al. (2022). Die Datenbasis des sich in der Entwicklung befindenden U-Shift bietet potenziell weitere Optimierungsmöglichkeiten als die der RoboVan-

Fahrzeuge, z. B. bei den angenommenen Materialien. Daher können die angenommenen Entwicklungsfaktoren für die LCA in Abbildung 5.20 als realistisch und plausibel angenommen werden.

Neben den Unterschieden bei Flottengröße und Fahrleistung beeinflussen die Automatisierung und der damit verbundene Energiebedarf (inklusive Batteriekapazität) die Ergebnisse erheblich. In Abbildung 5.22 wird daher ein Szenario mit progressiven und konservativen Annahmen untersucht. Für U-Shift und RoboVan werden im **progressiven Szenario** höhere Entwicklungsfaktoren angenommen, 3 % p. a. respektive 1 % p. a., um mögliche Fortschritte bei der Fertigung zu berücksichtigen. Für die Komponenten der Automatisierung werden höhere Lernraten angenommen: Der von 3 % p. a. auf 5 % p. a. erhöhte Entwicklungsfaktor liegt näher an Literaturannahmen zur Entwicklung von Sensorik [238, 257]. In Kapitel 5.4 werden mögliche Effizienzgewinne durch fahrerloses Fahren beim Energieverbrauch diskutiert. Für eine progressive Entwicklung in Abbildung 5.22 wird eine durchschnittliche Reduktion des Energieverbrauchs durch Automatisierung um 15 % angenommen [40], auch wenn Effekte wie Platooning in der Referenzanwendung S-Vaihingen nicht berücksichtigt werden. Im **konservativen Szenario** (ebenfalls Abbildung 5.22) wird gegenüber des Basisfalls die Entwicklung von U-Shift mit 1 % statt 2 % faktorisiert, der Energieverbrauch sowie die Entwicklungsfaktoren für Van und RoboVan entsprechen dem Basisfall.

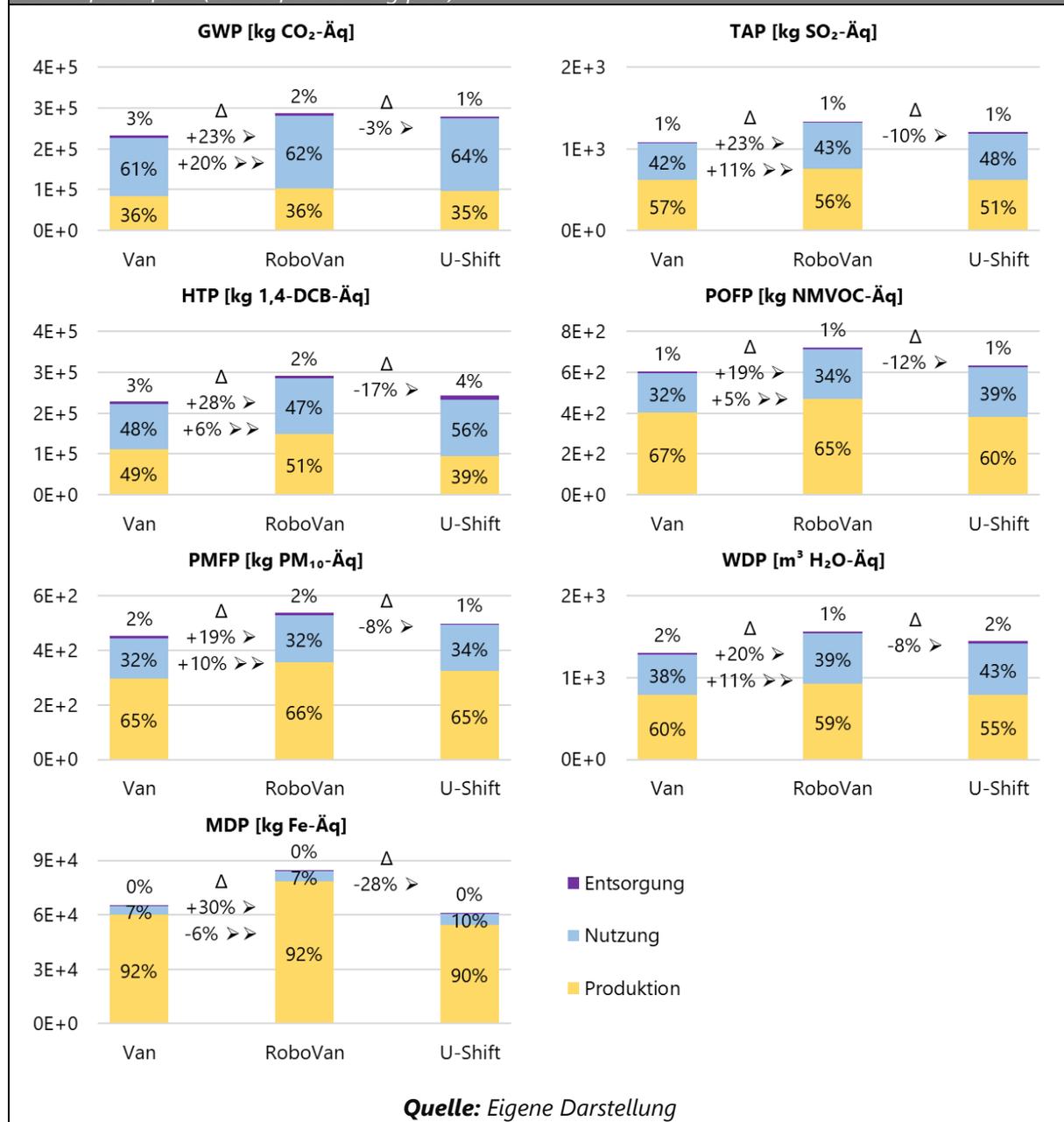
Szenario für die Mehrheit der Wirkkategorien weniger Umweltwirkungen als die Van-Flotte. Der Vergleich der Alternativen RoboVan und U-Shift ändert sich durch die progressiveren Annahmen kaum, da für beide Fahrzeugkonzepte ähnliche Fortschritte angenommen werden.

Bei einer **konservativen Entwicklung** von U-Shift wirkt sich die Van-Flotte ähnlich wie im Basisfall deutlich weniger auf die Umwelt aus als die U-Shift-Flotte, im Vergleich RoboVan und U-Shift ergibt sich ein ausgeglichenes Ergebnis für nahezu alle Wirkkategorien. Der im Vergleich zum Basisfall geringere Entwicklungsfaktor für U-Shift steigert die Emissionen vor allem in der Produktionsphase.

Nachdem die Gesamtheit aller ReCiPe-Wirkkategorien in den tabellarischen Übersichten analysiert wurden, werden weitere **Detailanalysen** für die in Kapitel 4.4.5 definierte Auswahl an Wirkkategorien¹⁹ durchgeführt: Klimawandel (GWP), terrestrische Versauerung (TAP), Humantoxizität (HTP), photochemische Ozonbildung (POFP), Feinstaubbildung (PMFP), Wasserverknappung (WDP) und Mineralienabbau (MDP). Die nachfolgenden Analysen basieren auf den Annahmen im Basisfall (Abbildung 5.20). Abbildung 5.23 stellt für die ausgewählten Wirkkategorien die absoluten Emissionswerte, differenziert nach Lebenszyklusphasen, dar.

Abbildung 5.23: Umweltwirkungen für ausgewählte Wirkkategorien

Werte für die Fahrzeugkonzeptalternativen Van, RoboVan und U-Shift in absoluten Zahlen bezogen auf den Referenzfluss (Flottenfahrleistung p. a.)



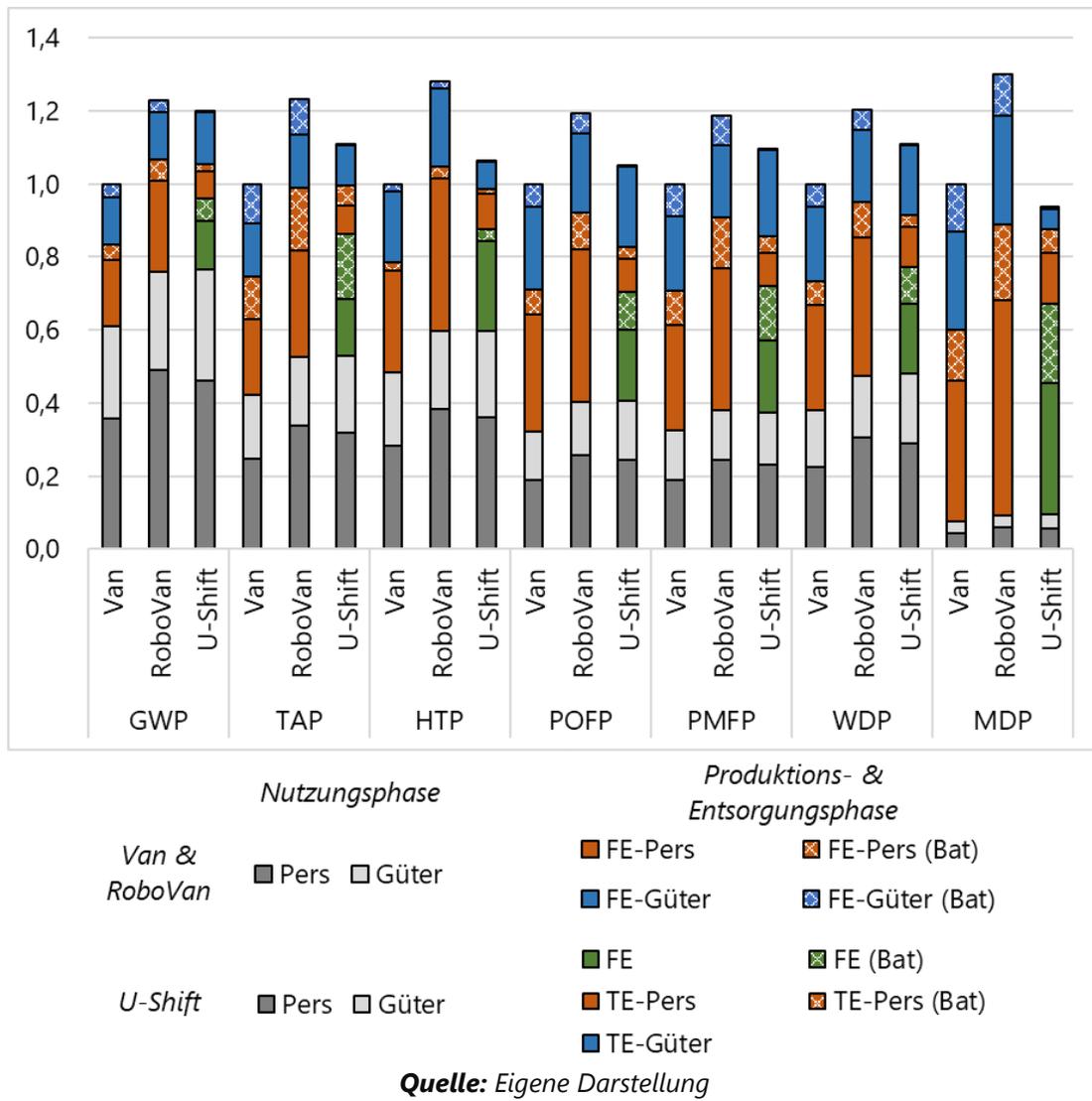
Die detaillierten Analysen zeigen, dass die **Entsorgungsphase** für alle Fahrzeugkonzeptalternativen von geringem Einfluss (0–4 %) ist. Dies stimmt mit Erkenntnissen aus der Literatur zur Ökobilanzierung von batterieelektrischen Fahrzeugen überein [265]. In der **Nutzungsphase** sind sowohl Emissionen durch die Nutzung (Tank-to-Wheel: Nicht-Abgas-Emissionen) als auch die Emissionen beinhaltet, die bei der Erzeugung des in der Nutzung benötigten Stroms entstehen (Well-to-Tank). Der Anteil der

Nutzungsphase bei GWP (Well-to-Wheel) beträgt 61–64 % und entspricht damit Literaturwerten zu batterieelektrischen [413] sowie zusätzlich automatisierten Fahrzeugen [40] mit je 70 %. Vergleichbare Anteile für POFP und PMFP stimmen ebenfalls überein (je ca. 40 % [413]). Die Anteile der **Produktionsphase** sind für alle Wirkkategorien bei U-Shift geringer als bei den Alternativen, da die geringere Anzahl von Fahreinheiten sowie die langlebigen Transporteinheiten anteilig geringere Emissionen verursachen. Im Vergleich zur Van-Flotte liegen die absoluten Werte von U-Shift (bis auf GWP) in einem ähnlichen Bereich, d. h., dass die 60 % weniger Fahreinheiten den zusätzlichen Aufwand für Automatisierungskomponenten und Transporteinheiten ausgleichen.

In Abbildung 5.24 werden die **Bestandteile des Produktsystems** nach ihren Beträgen zu der Umweltwirkung analysiert. In der Nutzungsphase werden Citylogistik und Paketdienste zu Gütertransporten zusammengefasst, während bei der Produktion und Entsorgung die Fahreinheiten bzw. Fahrzeuge, Transporteinheiten sowie Traktionsbatterien unterschieden werden. Letztere werden aufgrund ihres hohen Einflusses auf Elektrofahrzeuge [264, 265] gesondert aufgeführt.

Abbildung 5.24: Hauptverursacher der Umweltwirkungen im Fahrzeugkonzeptvergleich

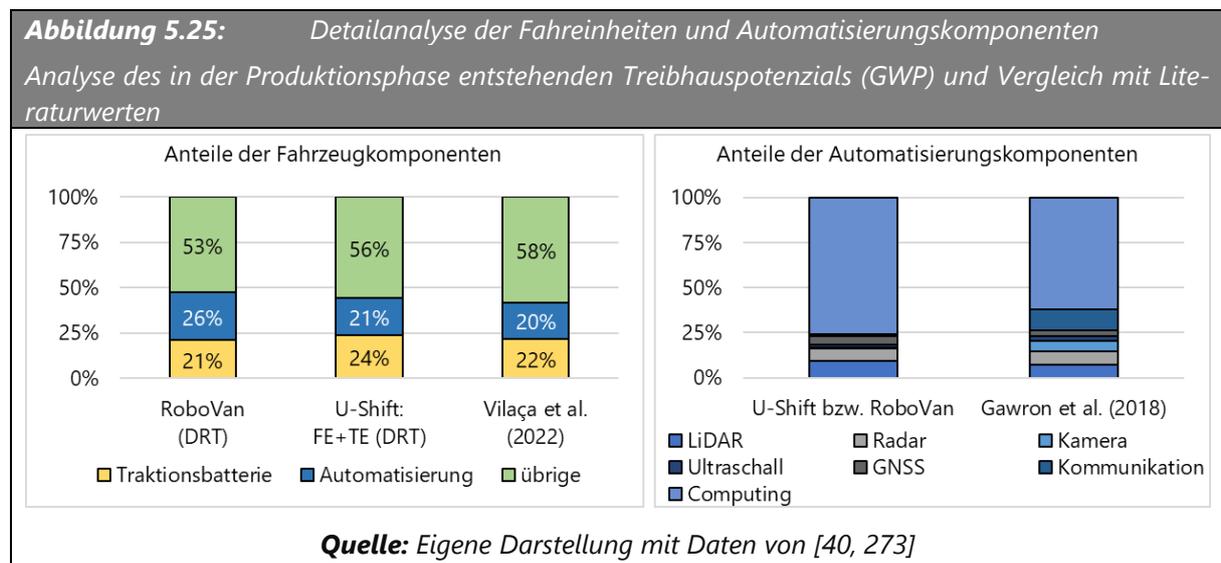
Werte sind auf die Van-Ergebnisse als Referenz normiert; die Wirkkategorien sind in Tabelle K.1 definiert; in der Produktion (P) und Entsorgung (E) sind Emissionen der Stromerzeugung in den Werten zu den Fahrereinheiten (FE), Transporteinheiten (TE) und Batterien (Bat) enthalten; die Nutzungsphase (N) wird in Personentransport (P, beinhaltet DRT) und Gütertransporte (G, beinhaltet Paketlieferung und Citylogistik) unterschieden; die Nutzungsphase umfasst auch die Strombereitstellung (Well-to-Wheel)



Bei U-Shift wird aufgrund der Modularität zwischen Emissionen die durch Fahrereinheiten verursacht werden und solchen, die durch Transporteinheiten verursacht werden, unterschieden. Da Transporteinheiten von U-Shift eine längere Lebensdauer haben als die Referenzfahrzeuge (Van, RoboVan) und U-Shift-Fahrereinheiten, haben sie trotz ihrer hohen Anzahl einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Emissionen des Produktsystems.

Die Emissionen, die direkt (Nutzungsphase) oder indirekt (Produktion, Entsorgung) durch den **Personentransport** entstehen, verursachen den größten Anteil an den Gesamtemissionen. Dies gilt für nahezu alle Wirkkategorien und korreliert mit dem höheren Anteil des Personentransports an der Fahrleistung aus dem Einsatzszenario (55–60 %, Kapitel 5.3). Zudem haben alle Fahrzeugkonzepte im Personentransport einen höheren Energiebedarf, bei U-Shift unter anderem da die Transporteinheit für den Personentransport schwerer und technisch komplexer (inklusive zusätzlicher Batterie und Sensorik) als die Transporteinheiten für die Güteranwendungen ist.

Neben den Transportprozessen hat die **Produktion der Fahreinheiten** in allen betrachteten Wirkkategorien den höchsten Einfluss auf die Umweltwirkungen. Am Beispiel der Fahrzeuge und -einheiten für den DRT-Betrieb (Personentransport) werden die wesentlichen Emittenten identifiziert: Abbildung 5.25. Bei U-Shift wird dazu die Summe aus der Fahreinheit und der Personen-Transporteinheit gebildet.



Für eine Validierung der Ergebnisse anhand der Literatur wird eine Ökobilanzierung fahrerloser Fahrzeuge im Ridesharing [273] mit den ebenfalls fahrerlosen Konzepten RoboVan und U-Shift verglichen. Für das Treibhauspotenzial ermitteln Vilaça et al. (2022) Anteile an den CO₂-Äq-Emissionen von je ca. 20 % durch die Traktionsbatterie

und die Automatisierungskomponenten [273]. Die ermittelten Werte für U-Shift und RoboVan stimmen hiermit sehr gut überein.

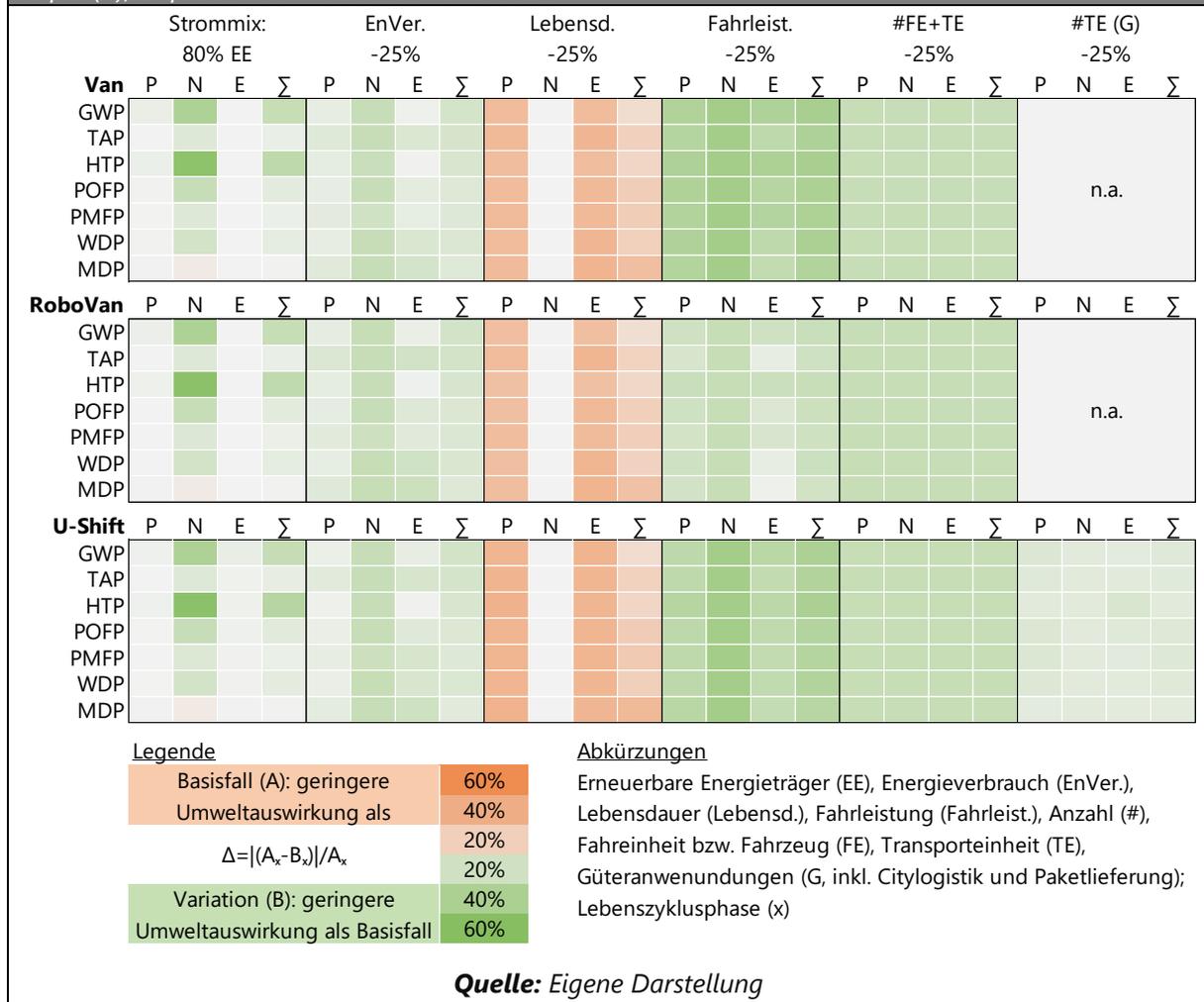
Im Vergleich zwischen Gawron et al. (2018) und den ermittelten Werten für U-Shift und RoboVan (Abbildung 5.25, rechts) gleichen sich die Anteile der Automatisierungskomponenten an den GWP-Emissionen mit Ausnahme der Kommunikation und des Computing ausreichend gut [40]. Insbesondere eine verbesserte Datengrundlage für die Modellierung des Computing wäre daher sinnvoll, für den Vergleich der Fahrzeugkonzepte hat dies aber nur geringe Auswirkungen.

5.6.3 Sensitivitätsanalyse der Ökobilanzierung

Entsprechend der in Kapitel 4.4 entwickelten Vorgehensweise werden Sensitivitätsanalysen für die Parameter Strommix, Energieverbrauch und Lebensdauer durchgeführt. Zudem werden Einsatzszenarien-spezifische Faktoren variiert: Fahrzeugkilometer, Flottengröße und zusätzlich bei U-Shift die Anzahl von Transporteinheiten (Abschnitt 4.4.6). Bei der Änderung der Flottengröße wird die Anzahl aller Einheiten (Fahr- und Transporteinheiten) um $\pm 25\%$ variiert, während beim Verhältnis der Transport- zu Fahreinheiten nur die Anzahl der Transporteinheiten für die Citylogistik und Paketlieferung variiert wird.

Abbildung 5.26 zeigt die Sensitivitäten der Umweltwirkungen von Van, RoboVan und U-Shift in ausgewählten Wirkkategorien bei variierten Parametern. Die tabellarische Übersicht zeigt die fahrzeugkonzeptspezifischen Ergebnisse für alle Lebenszyklusphasen sowie deren Summen. Die Darstellung umfasst lediglich die Variation der Parameter in eine Richtung. Eine Variation in die entgegengesetzte Richtung zeigt einen gleich hohen, jedoch inversen Einfluss auf die Umweltwirkungen.

Abbildung 5.26: Fahrzeugkonzeptspezifische Sensitivitätsanalyse der Ökobilanzierung
 Unterschied durch variierte Parameter veränderter Fahrzeugkonzepte (B) gegenüber dem jeweiligen Basisfall (A); Definition der Indikatoren in Tabelle K.1



Ein erhöhter Anteil erneuerbarer Energieträger bei der Stromerzeugung, ein reduzierter Energieverbrauch, eine längere Lebensdauer, eine geringere Fahrleistung und eine kleinere Flottengröße reduzieren erwartungsgemäß die Umweltwirkungen. Die jeweils umgekehrten Parametervariationen erhöhen die Umweltwirkungen in gleichem Maß. Im Mittel über alle Wirkkategorien bewirkt eine Variation der Fahrleistung die größten Ergebnisänderungen im Parametervergleich.

Energieverbrauch und Strommix beeinflussen vor allem die Nutzungsphase, da die Well-to-Tank-Emissionen während der Erzeugung des Stroms für die Nutzung dieser Phase allokiert wird. Bei einer Änderung des Strommix verhält sich der Mineralienabbau

(MDP) konträr zu den übrigen Wirkkategorien. Ein erhöhter Anteil erneuerbarer Energieträger verringert die Umweltwirkungen für die meisten Wirkkategorien, allerdings werden für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen mehr für MDP relevante Ressourcen, wie z. B. Gold und Kupfer in Elektronikbauteilen [414] benötigt. Daher erhöhen sich die Fe-Äq-Emissionen bei einer Erhöhung der erneuerbaren Energieträger.

Eine erhöhte **Fahrleistung** bedeutet eine kürzere kalendarische **Lebensdauer**. Beide Parameter wirken auf die Produktions- und Entsorgungsphase, da bei einer längeren Lebensdauer die Emissionen eines Fahrzeugs anteilig weniger berücksichtigt werden. Die Fahrleistung verändert zudem die Emissionen während der Nutzungsdauer, da eine erhöhte Fahrleistung mehr Energiebedarf verursacht. Eine Variation der Fahrleistung hat im Vergleich der Fahrzeugkonzeptalternativen den höchsten Einfluss auf die Van-Flotte, da diese in der Referenzanwendung S-Vaihingen eine um 9 % bzw. 12 % höhere Fahrleistung als RoboVan bzw. U-Shift hat.

Zwischen der **Flottengröße** und den Umweltwirkungen besteht für alle Wirkkategorien eine lineare Korrelation, da die Inputparameter des Ökobilanz-Modells in direktem Bezug zu der Flottengröße stehen. Alle Werte dieses Szenarios werden bei einer Variation der Flottengröße um $\pm 25\%$ um denselben Wert verändert. Eine Änderung des Verhältnisses von U-Shift-**Transporteinheiten** für die Güteranwendung zu Fahreinheiten bewirkt moderate Änderungen zwischen $\pm 10\text{--}15\%$, wobei die Umweltwirkungen mit einer Erhöhung der Anzahl von Transporteinheiten steigen.

In der Summe aller Lebenszyklusphasen haben die Parameter Fahrleistung und Flottengröße den größten Einfluss auf die Ökobilanz, während die Ergebnisse weniger auf Variationen des Strommix, des Energieverbrauchs, der Lebensdauer und der Anzahl von Transporteinheiten im Güterverkehr (U-Shift) reagieren.

5.6.4 Diskussion der LCA-Ergebnisse

Die Ökobilanz-Methodik wurde in Kapitel 4.4 weiterentwickelt, um sowohl neuartige, modulare Fahrzeugkonzepte für den Straßenverkehr, wie U-Shift, als auch integrale Fahrzeuge einheitlich zu bewerten. Beim Vergleich von on-the-road modularen mit integralen Fahrzeugen muss jeweils die gesamte Flotte in einem Anwendungsfall betrachtet werden, um die durch die Modularisierung induzierten systemischen Veränderungen zu berücksichtigen. Die jährliche RoboVan-Flottenfahrleistung ist entsprechend des Einsatzszenarios (Abschnitt 5.3) mit 1.020 Tsd. km um 3 % höher als die von U-Shift (Van: 1.123 Tsd. km; gegenüber U-Shift: +14 %), wobei mit 39 Fahrzeugen 85 % mehr RoboVan-Fahrzeuge als U-Shift-Fahreinheiten benötigt werden (Van: 48; gegenüber U-Shift: +130 %). Ein Vergleich auf Fahrzeug- statt Flottenebene würde das Ergebnis signifikant verändern, da der Vorteil modularer Konzepte – die effiziente Nutzung einer geringen Anzahl von Fahreinheiten – nicht berücksichtigt würde.

In 15 der in der Ökobilanz betrachteten 18 Wirkkategorien weist die U-Shift-Flotte geringere Umweltwirkungen auf als die RoboVan-Flotte. Das U-Shift-Konzept befindet sich derzeit in einer **frühen Entwicklungsphase**, weshalb keine vergleichbaren Ökobilanzen oder Daten von Serienfahrzeugen existieren. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei den Van- und RoboVan-Fahrzeugen um skalierte Serienfahrzeuge, für die bereits Daten in der ecoinvent-Datenbank vorliegen. Im Folgenden werden Annahmen diskutiert, die die Umweltwirkungen von U-Shift weiter reduzieren könnten, und an denen sich die Entwicklung künftiger Fahrzeuggenerationen orientieren kann.

Das hohe Verhältnis aus Transport- zu Fahreinheiten bei U-Shift und die zusätzliche Masse durch die Modularisierung wird im vorliegenden Einsatzszenario (Kapitel 5.3) durch eine geringe Anzahl von Fahreinheiten kompensiert. Sowohl eine Verringerung des Verhältnisses von Transport- zu Fahreinheiten als auch eine Verringerung der gesamten Flotte bewirken entsprechend den Ergebnissen der Parametervariationen geringere Umweltwirkungen. Durch in Operations-Research-Simulationen **optimierte Einsatzszenarien** kann sich die Anzahl benötigter Transporteinheiten reduzieren

(Kapitel 4.1.2 und 5.3.4) [33, 180]. Ein durch Simulationen optimiertes Einsatzszenario verringert zudem potenziell die Fahrleistung und damit die Umweltwirkungen. Dies gilt auch für die Referenzflotten integraler Fahrzeuge, allerdings ist die Reduktion bei U-Shift durch die zusätzlichen Transporteinheiten potenziell höher.

Eine längere **Lebensdauer** reduziert die Umweltwirkungen, wie die Sensitivitätsanalyse in vorherigem Kapitel zeigt. Insbesondere der Anteil an den Emissionen durch die Transporteinheiten wird signifikant durch die Lebensdauer beeinflusst. Die Modularisierungsstrategie von U-Shift besteht aus komplexen Fahreinheiten und gleichzeitig möglichst einfachen Transporteinheiten. Weitere Entwicklungen sollten daher eine möglichst umweltfreundliche Produktion und Entsorgung der Transporteinheiten sowie ein Design für möglichst lange Laufzeiten verfolgen.

Die **Nutzungsphase** hat den höchsten Anteil an den Emissionen für die meisten Wirkkategorien bei allen drei betrachteten Fahrzeugalternativen, wobei die Emissionen mit dem Energieverbrauch und der Fahrleistung korrelieren. Fortschritte bei der Fahrzeugentwicklung können vor allem den Energiebedarf senken, bei U-Shift z. B. durch in Leichtbau gefertigte Transporteinheiten, insbesondere bei den schweren Transporteinheiten für den Personentransport. Allerdings verschieben Effizienzgewinne in der Nutzungsphase durch Leichtbaumaterialien Emissionen in die Herstellungsphase [415, S. 739–741]. Für die Fahrzeugkonzepte muss daher das jeweilige Optimum gefunden werden.

Durchschnittlich haben die U-Shift-Fahreinheiten mit 47 Tsd. km eine um ca. 80 % bzw. 100 % höhere jährliche Fahrleistung als RoboVan-, respektive Van-Fahrzeuge (Kapitel 5.3), weshalb sie in **kürzeren Zyklen** durch neue Einheiten ersetzt werden. Dies bietet die Chance, verbesserte und potenziell effizientere Technologien für Fahreinheiten schneller in Betrieb zu nehmen. Die technische Weiterentwicklung folgender Fahrzeuggenerationen ist im vorliegenden Ökobilanz-Modell bislang nicht berücksichtigt, bietet aber das Potenzial, die Umweltwirkungen signifikant zu verringern.

In weiteren Arbeiten könnte das Ökobilanz-Modell zudem unter anderem um eine Ökobilanz zu sozialen Parametern [210] und eine Untersuchung der Kreislauffähigkeit [416] der Produktsysteme erweitert werden.

Da das Einsatzszenario einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat, muss die erarbeitete Methode auf die jeweils zu bewertende Situation angewendet werden.

6 Prospektive Technologieentwicklung und disruptives Potenzial

Die neuartigen Fahrzeugkonzepte wurden im vorherigen Kapitel anhand ihres Nutzens, ihrer Kosten und ihrer Umweltwirkungen detailliert untersucht. Als Ausblick auf mögliche künftige Entwicklungen der neuartigen Fahrzeugkonzepte am Markt wird deren prospektive Verfügbarkeit am Markt sowie deren disruptives Potenzial im Folgenden analysiert. Dies erfolgt anhand der methodischen Grundlage aus Kapitel 4.

6.1 Analyse der prospektiven Technologieentwicklung

Die in Kapitel 4.5 entwickelte Methode zur Vorhersage der zeitlichen Entwicklung von Technologien wird in diesem Kapitel auf die neuartigen Fahrzeugkonzepte angewendet. Dazu wird zunächst der kritische Technologiepfad dieser Fahrzeugkonzepte empirisch identifiziert und für diesen anschließend eine Publikationsanalyse zu relevanten Funktionen durchgeführt. Im Abgleich mit einer Technologie-Roadmap, entwickelt in einer Delphi-Befragung, wird die voraussichtliche technologische Marktreife der neuartigen Fahrzeugkonzepte abgeleitet.

In einer **Online-Umfrage** mit 16 Teilnehmenden unter anderem aus den Branchen Automobilbau und Logistik (Expertise der Teilnehmenden: Kapitel 4.2.3 bzw. Tabelle E.2) wurde der kritische Technologiepfad ermittelt, der die Einführung neuartiger Fahrzeugkonzepte verzögert. 13 der 16 Teilnehmenden gaben die Automatisierung hin zu fahrerlosem Fahren als den kritischsten Technologiepfad mit spätestester Marktreife an, gefolgt von Vernetzung (8) und on-the-road Modularisierung (6). Die Ergebnisse der Online-Umfrage sind in Anhang E, Tabelle E.3 und Tabelle E.4, aufgeführt.

Entsprechend der Online-Umfrage wird die **prospektive Entwicklung von Fahrzeugautomatisierungstechnologien** analysiert, zumal die Entwicklung hochautomatisierter und autonomer Fahrzeuge Teil der Produkt- und Technologiestrategien von Automobilherstellern und Zulieferern ist [417–419].

6.1.1 Publikationsanalyse zu funktionalen Entwicklungen

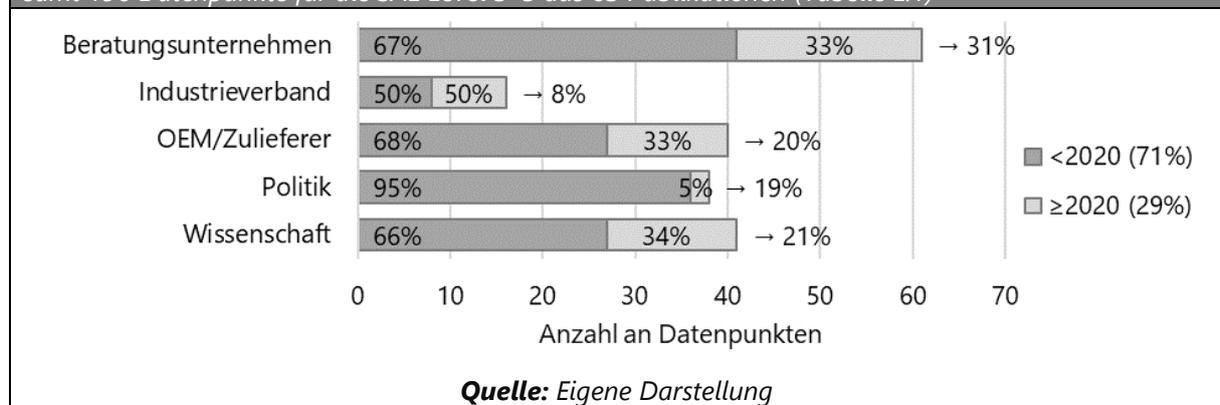
Aus einer Analyse von 63 Publikationen geht hervor, dass Prognosen zur Marktreife überwiegend für Automatisierungslevel vorliegen, nicht aber für einzelne Assistenzsysteme. Daher werden die weit verbreiteten Automatisierungsstufen **SAE Level 0–5** der Norm SAE J3016 als Funktionen des Technologiepfads fahrerloses Fahren festgelegt. Ab SAE Level 4 wird der Mensch weder für die Fahrzeugführung, noch für die Umgebungsbeobachtung oder als Rückfallebene benötigt. SAE Level 4 und 5 unterscheiden sich dahingehend, dass Level-4-Fahrzeuge nur in definierten Gebieten unter vorab definierten Betriebsbedingungen selbstständig fahren können [420].

Ende des Jahres 2021 wurde für Mercedes-Benz die weltweit erste Typgenehmigung für eine Assistenzfunktion des SAE Level 3 durch das Kraftfahrt-Bundesamt zugelassen [421], weshalb die Level 0–2 in der Publikationsanalyse nicht berücksichtigt werden.

Für die Publikationsanalyse wurden **63 Quellen** verschiedener Kategorien aus den Jahren 2013 bis 2022 ausgewertet, wobei Informationen zur Marktreife verschiedener SAE Level in Serienfahrzeugen strukturiert erfasst wurden. Daraus ergeben sich ca. 200 Datenpunkte: Abbildung 6.1. Die Quellennachweise sind im Anhang in Tabelle L.1 aufgeführt.

Abbildung 6.1: Übersicht der analysierten Publikationen zu Automatisierungslevel

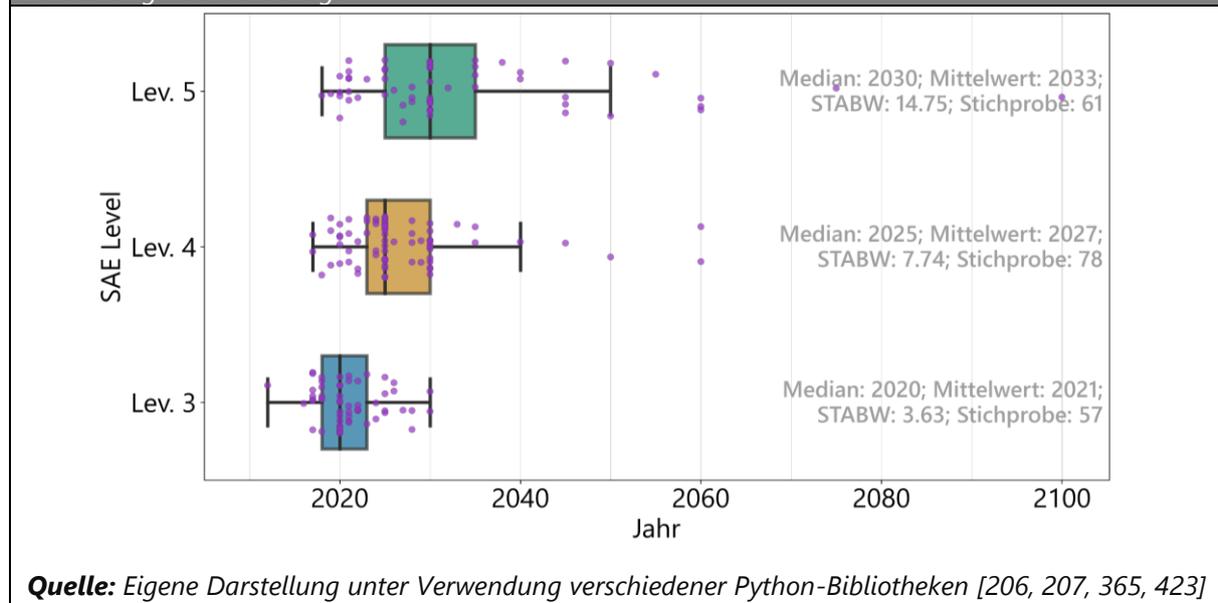
Darstellung der Datenpunkte in den Publikationen nach Branche und Veröffentlichungsdatum; insgesamt 196 Datenpunkte für die SAE Level 3–5 aus 63 Publikationen (Tabelle L.1)



Die strukturierten Daten werden für die SAE Level 3–5 mittels Python in einem **Boxplot-Diagramm**⁴⁷ ausgewertet: Entsprechend einer Auswertung des Medians wird autonomes Fahren (SAE Level 5) voraussichtlich im Jahr 2030 marktreif, während die beiden vorherigen Automatisierungsstufen 5 bzw. 10 Jahre vorher erreicht werden. Die Mittelwerte sind jeweils später datiert als die Mediane. Die Standardabweichung der Datenpunkte für SAE Level 3 ist deutlich geringer (3,63) als bei SAE Level 4 (7,74) oder SAE Level 5 (14,75). Je weiter die Funktionseinführung entfernt ist, desto unsicherer ist die Vorhersage und desto größer ist die Streuung der jeweiligen Prognosen, welches die Ausreißer (2055, 2060, 2075 und 2100) bei SAE Level 5 bestätigen.

Abbildung 6.2: Publikationsanalyse zur Markteinführung verschiedener SAE Level

Publikationen aller Kategorien und Veröffentlichungszeitpunkte (Abbildung 6.1) werden in der Boxplot-Darstellung⁴⁷ berücksichtigt



Quelle: Eigene Darstellung unter Verwendung verschiedener Python-Bibliotheken [206, 207, 365, 423]

⁴⁷ Das Rechteck (Box) wird durch das 25. Perzentil und das 75. Perzentil der Daten begrenzt und enthält den Median, dargestellt durch eine vertikale Linie. Antennen zu beiden Seiten der Box zeigen das statistische Minimum bzw. Maximum. Das Boxplot-Diagramm wird durch ein Punktdiagramm ergänzt, welches die einzelnen Datenpunkte zeigt. Alle Punkte außerhalb der Antennen werden als Ausreißer bezeichnet [422].

SAE Level 3 hätte gemäß der Publikationsanalyse bereits 2020 marktreif sein sollen, die erste Typgenehmigung für ein entsprechendes Fahrzeug wurde aber erst 2021/2022 erteilt [421].

Werden die Quellen nach **Veröffentlichungszeitpunkt** vor und nach 2020 differenziert, bleiben die Aussagen in etwa konstant, SAE Level 3 wird jedoch von den Quellen nach 2020 im Median korrekt auf 2021/2022 datiert. Quellen vor 2016 erwarten SAE Level 4 im Mittel 4 Jahre später als Quellen nach 2020, d. h. die 4. Automatisierungsstufe wird zeitlich früher erwartet. Das 25. und 75. Perzentil für die Prognose von SAE Level 5 verschieben sich gegenüber Abbildung 6.2 um jeweils ca. 5 Jahre in die Zukunft, wenn Quellen mit einem Veröffentlichungsdatum ab 2020 betrachtet werden, der Median liegt jedoch unverändert bei 2030. Im Vergleich zu früheren Quellen ist die Streuung dabei signifikant kleiner, d. h. die Prognose scheint sich zu verstetigen (Median: 2030; Mittelwert: 3–4 Jahre später).

Werden die Prognosen durch **OEM** und Zulieferer aus der Automobilindustrie aus der Publikationsanalyse ausgeschlossen, da sie einen zu optimistischen Ausblick auf die Einführung ihrer neuen Automatisierungsfunktionen haben könnten, wird die Verteilung der Ergebnisse für SAE Level 5 breiter. Die Mediane und Bandbreiten der beiden anderen Level bleiben jedoch konstant. Veröffentlichungen aus der **Wissenschaft** prognostizieren die letzte Automatisierungsstufe im Mittel 5 Jahre später als im Basisfall auf 2035.

6.1.2 Delphi-Befragung zur Analyse technologischer Entwicklungen

Im vorherigen Schritt wurden die Automatisierungslevel als Funktionen definiert. Für diese werden entsprechend der in Kapitel 4.5 erarbeiteten Vorgehensweise relevante Technologien identifiziert und deren zeitliche Entwicklung anhand von Technologie- und Herstellungsreifegrade (Tabelle 4.7) in einer Delphi-Expertenbefragung ermittelt.

Mittels einer Literaturanalyse und einem iterativen Delphi-Prozess wurden **57 Technologien in 13 Modulen** als relevant für die Automatisierungsfunktionen identifiziert. Die

Module umfassen Radar, LiDAR, Kamera, Ultraschall, Aktuatoren, X-by-Wire, Positionsbestimmung, Satellitenbasierte Positionsbestimmung, Langstreckenkommunikation, Kurzstreckenkommunikation, Fahrzeuginterne Kommunikation, E/E und Mikrosystemtechnik. Eine Zuordnung der Technologien zu den Modulen erfolgt im Anhang in Tabelle L.2. Dabei wurden vor allem Hardware-Technologien im Fahrzeug berücksichtigt.

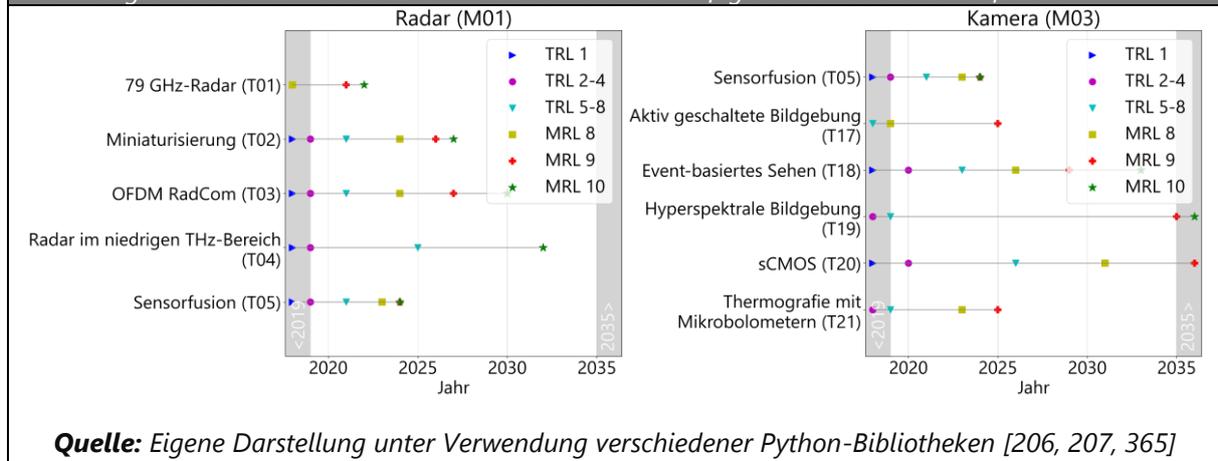
Für alle Technologien wurden Kurzbeschreibungen erstellt und anschließend ein Fragebogen erarbeitet, in dem Expertinnen und Experten nach der Vollständigkeit der Technologieliste, nach einer Verifizierung der Kurzbeschreibung und nach einer Einschätzung der zeitlichen Entwicklung der Technologien befragt wurden.

Ein geeignetes **Expertenpanel** ist essentiell für eine Delphi-Befragung [306], wobei die Teilnahmequote erfahrungsgemäß gering ist [424]. Es wurden 86 nationale und internationale Expertinnen und Experten kontaktiert (70 % aus der Industrie), wovon 20 % im Expertenpanel teilgenommen haben (Tabelle L.4). Die Antworten aus der im Jahr 2020 durchgeführten Delphi-Befragung sind im Anhang in Tabelle L.3 erfasst: eine Technologieliste mit Kurzbeschreibung und zeitlicher Entwicklung.

Die so ermittelte zeitliche Entwicklung der Technologien wird in einer Roadmap-Darstellung visualisiert. Die **Technologie-Roadmaps** sind in Abbildung 6.3 beispielhaft für die Module Radar und Kamera dargestellt. Eine Roadmap aller Technologien befindet sich im Anhang: Abbildung L.1. Die Kurzbeschreibungen in Tabelle L.3 liefern dabei die jeweils hier verwendeten Definitionen zu den betrachteten Technologien (Verständnis und Kontext).

Abbildung 6.3: Roadmaps der Module Radar und Kamera (Stand des Wissens: 2020)

Die zeitliche Entwicklung wurde in der im Jahr 2020 durchgeführten Delphi-Befragung ermittelt; die Technologien werden in Tabelle L.3 beschrieben und die Reifegrade in Tabelle 4.7 definiert

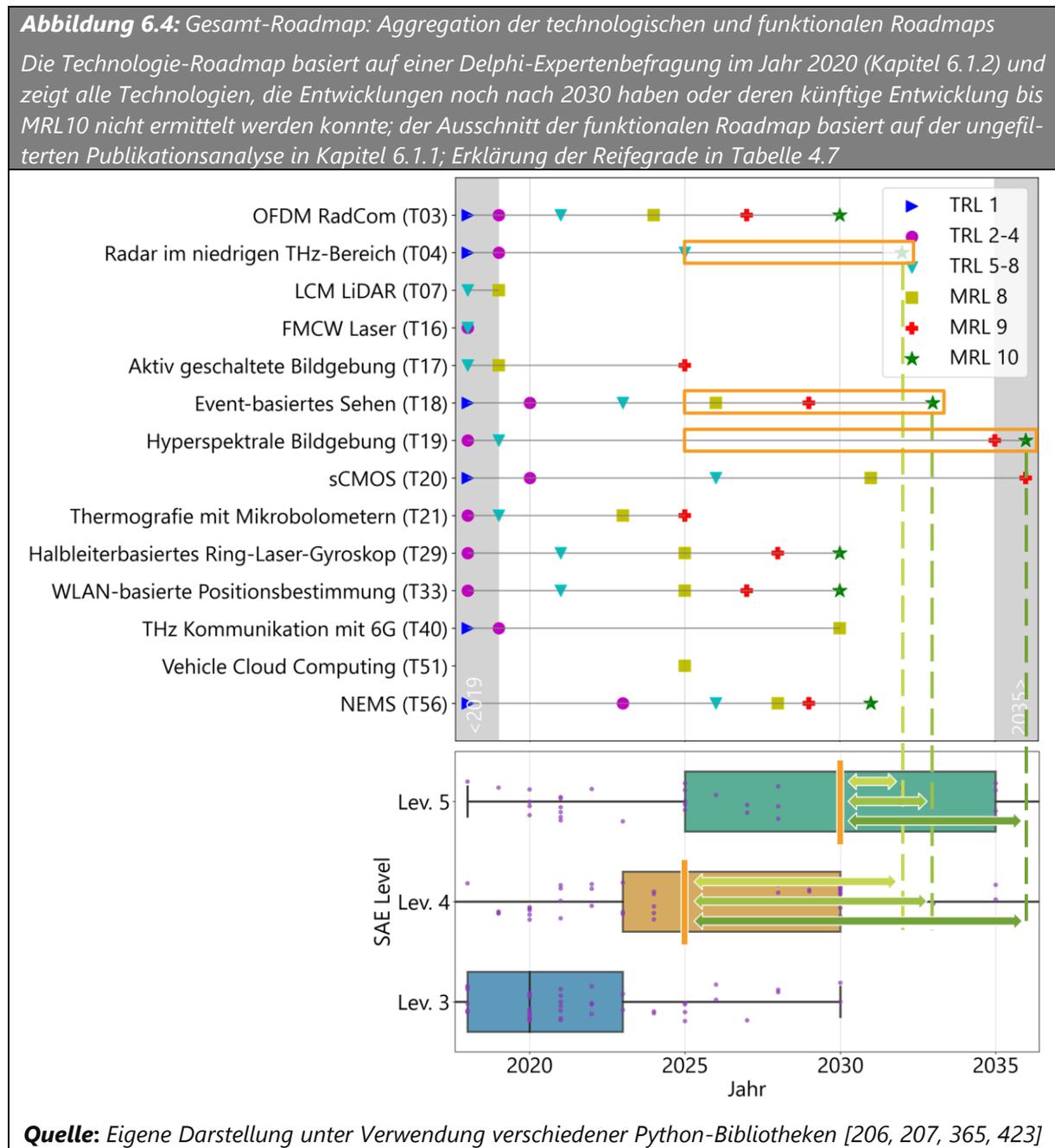


Bei den meisten Technologien der beiden Module liegt der Schwerpunkt kurzfristig (bis 2025) auf den technologischen Entwicklungen (TRL); mittel- bis langfristig wird die Erreichung der Herstellungsreifegrade (MRL) erwartet. Ender die dargestellten Entwicklungspfade nicht mit MRL 10 bedeutet das nicht, dass die Technologie diesen Reifegrad nicht erreichen wird, sondern, dass dazu keine Aussage in der Delphi-Befragung ermittelt werden konnte. Insbesondere Radarsysteme im niedrigen THz-Bereich, Event-basiertes Sehen, hyperspektrale Bildgebung und sCMOS werden MRL 10 erst nach 2030 erreichen, d. h. nachdem gemäß Publikationsanalyse SAE Level 5 erreicht sein soll (Kapitel 6.1.1). Durch die Aggregation der funktionalen und technologischen Roadmaps werden diese Diskrepanzen untersucht.

6.1.3 Aggregation der funktionalen und technologischen Roadmaps

Die Technologie-Roadmap sowie die funktionale Roadmap bieten für sich genommen bereits jeweils wertvolle Informationen, eine Aggregation beider Roadmaps zeigt darüber hinaus potenzielle Abhängigkeiten und Diskrepanzen zwischen Funktionen und Technologien (Abschnitt 4.5.2). Damit bietet die Gesamt-Roadmap eine umfassendere Grundlage für strategische Entscheidungen sowie für die Ableitung der Marktreife automatisierten Fahrens und damit der neuartigen Fahrzeugkonzepte dieser Arbeit.

Abbildung 6.4 **aggregiert beide Roadmaps**, wobei die funktionale Roadmap auf die Jahre zwischen 2020 und 2035 begrenzt wird. In der Technologie-Roadmap werden alle Technologien aufgeführt, die MRL 10 bis 2030 voraussichtlich noch nicht erreicht haben oder deren Entwicklung nicht abschließend ermittelt werden konnte.



Im **Vergleich der Roadmaps** fällt auf, dass sich einige Technologien voraussichtlich noch nach 2025 bzw. 2030 in Entwicklung befinden, d. h. nachdem Serienfahrzeuge mit

SAE Level 4 und 5 entsprechend der funktionalen Roadmap am Markt verfügbar sein sollen. Der Einfluss der Technologien auf die Funktionen wird im Folgenden geprüft, um die Ergebnisse interpretieren zu können.

Die in Abbildung 6.4 orange hervorgehobenen Technologien „Radar im niedrigen THz-Bereich“, „Event-basiertes Sehen“ und „Hyperspektrale Bildgebung“ könnten eine wirtschaftliche Einführung hoch- und vollautomatisierter Fahrzeuge (SAE Level 4 und 5) potenziell begünstigen. Die Nutzung von Radarsystemen mit Frequenzbereichen ab 100 GHz ermöglicht eine Entfernungsauflösung im Zentimeterbereich deutlich genauer als aktuelle Systeme mit z. B. 77 GHz. Ab ca. 250 GHz sind die Aufnahmen nahe an der Qualität von Kamerasystemen hinsichtlich Kontrast und Auflösung (T04 in Tabelle L.3) [425]. Beim Event-basierten Sehen werden nur Ereignisdaten erfasst, d. h. lokale Änderungen der Helligkeit. Im Gegensatz zu konventionellen Kamerasystemen wird die Datenrate damit signifikant reduziert, bei gleichzeitig geringerer Latenz und weniger rechenintensiver Bildverarbeitung (T18 in Tabelle L.3) [426]. RGB-Kameras erfassen die drei elektromagnetischen Spektren sichtbaren Lichts Rot, Grün und Blau, wohingegen Hyperspektralkameras ca. 100 Kanäle inklusive des Infrarotspektrums aufnehmen. Damit können zusätzliche Informationen der Umgebung wie z. B. Straßenzustand anhand von Materialsignaturen erfasst werden (T19 in Tabelle L.3) [427].

Die genannten Technologien verbessern die Perzeption, weshalb ihre Entwicklung mit den SAE Level 4 und insbesondere 5 verknüpft werden kann. Andere Technologien in Abbildung 6.4 sind 2025 bzw. 2030 ebenfalls noch nicht bereit, können aber besser substituiert werden bzw. ihr Beitrag ist weniger essentiell für einen wirtschaftlichen und sicheren Einsatz fahrerloser Fahrzeuge.

Nach der Analyse der Zusammenhänge zwischen Technologien und Funktionen erscheint ein vollständiger **Markteintritt für das SAE Level 5** im Jahr 2030 zu früh, realistischer ist ein Markteintritt im Jahr 2035. Eine Marktreife von vollautomatisierten Fahrzeugen in 2035 wurde auch in der Metaanalyse der wissenschaftlichen Publikationen ermittelt. Für SAE Level 4 prognostizieren Publikationen unterschiedlicher

Quellenkategorien im Mittel 2025 als Einführungsjahr. Da dieses Level fahrerloses Fahren nur unter definierten Bedingungen vorsieht, sind entsprechend der technologischen Analyse die benötigten Technologien bis dahin verfügbar.

Die Marktreife der **neuartigen Fahrzeugkonzepte** ist somit abhängig von den Betriebsbedingungen unter denen sie eingesetzt werden sollen. Ist eine Vollautomatisierung erforderlich, sind sie voraussichtlich spätestens im Jahr 2035 marktreif.

6.1.4 Zusammenfassung der Technologievorhersage

Für die prospektive Verfügbarkeit von neuartigen Fahrzeugkonzepten wurde in einer Online-Expertenbefragung die Automatisierung als der Technologiebereich identifiziert, welcher die Entwicklung der Fahrzeugkonzepte am stärksten verzögert. In Kapitel 4.5 wurde eine Methode entwickelt, bei der eine funktionale Roadmap, abgeleitet aus Publikationsanalysen zu verschiedenen Automatisierungsstufen, und Technologie-Roadmaps kombiniert werden, um die Marktreife fahrerlosen Fahrens zu prognostizieren. Die Technologie-Roadmaps entstanden in einem zweistufigen Delphi-Expertenprozess für 57 Technologien mit Relevanz für die Automatisierungsstufen. Aus der aggregierten Roadmap wird eine Marktreife von fahrerlosem Fahren für voraussichtlich 2030–2035 prognostiziert.

Die **aggregierte Gesamt-Roadmap** dient einer verbesserten Grundlage für Experten-Workshops sowie strategischen Entscheidungen, besitzt aber nicht den Anspruch, dass sich die Zukunft exakt so entwickelt. Die entwickelte Methode erhöht die Zuverlässigkeit der Prognosen durch die Gegenvalidierung zweier Ansätze der Technologievorhersage und lässt sich auf unterschiedliche Technologiebereiche anwenden.

Im Folgenden werden Einschränkungen der Ergebnisse und methodische Potenziale diskutiert, die in künftigen Arbeiten adressiert werden können.

Die Marktreife der neuartigen Fahrzeugkonzepte wird anhand der Automatisierung abgeleitet, da Expertinnen und Experten in einer Online-Umfrage die Automatisierung als kritischsten Technologiepfad solcher Fahrzeugkonzepte identifizierten. Falls ein

anderer Technologiebereich die Verfügbarkeit stärker verzögert, muss dessen zeitliche Entwicklung als neue kritische Grundlage angenommen werden.

In der technologischen Betrachtung wurden 57 Technologien, größtenteils aus der Fahrzeug-Hardware, analysiert. In einem nächsten Schritt sollten auch **Software- und Infrastrukturtechnologien** berücksichtigt werden, von welchen ebenfalls Entwicklungen zu erwarten und die für die Umsetzung von Automatisierungsfunktionen wesentlich sind. Je nach Automatisierungsansatz kann ein Teil der Hardware und Software im Fahrzeug entfallen, wenn diese in eine durch alle Verkehrsteilnehmer gleichermaßen genutzte Infrastruktur ausgelagert wird: infrastrukturbasierte, statt fahrzeugbasierte Automatisierung. Dadurch werden Fahrzeuge potenziell preiswerter und der Verkehr kann orchestriert werden, andererseits sind hohe initiale Investitionen sowie gemeinsame Standards erforderlich. Der Ansatz wird im asiatischen Raum bereits verfolgt, während europäische und US-amerikanische Fahrzeughersteller den fahrzeugbasierten Ansatz präferieren, für den die erarbeiteten Roadmaps gültig sind [401, 428, 429].

Die Nutzung weiterer Prognosemethoden, wie z. B. **patentbasierter S-Kurven**-Lebenszyklusmodelle, ist empfehlenswert, da hierdurch eine zusätzliche Gegenvalidierung der beiden bisherigen Methoden erfolgt.

Aufgrund der sich ändernden Forschungslandschaft und Randbedingungen können der aktuelle Wissensstand und damit die Roadmaps bereits nach kurzer Zeit veraltet sein. Die Delphi-Befragung für diese Arbeit wurde in 2020, die Publikationsanalyse in 2022 durchgeführt. In einem kontinuierlichen Prozess müssen neue Quellen berücksichtigt werden und die Delphi-Befragung zur **Aktualisierung** der prospektiven Technologieentwicklung wiederholt werden.

6.2 Bestimmung des disruptiven Potenzials

Da Disruptionen ex-ante nicht vorhergesehen werden können (Kapitel 4.6), wird stattdessen das disruptive Potenzial der in Kapitel 2 definierten Fahrzeugklassen⁴⁸ anhand ihrer repräsentativen Vertreter (Abbildung 2.3) bewertet⁴⁹. Entsprechend der in Kapitel 4.6 erarbeiteten Methodik wird ein Erwartungswert anhand verschiedener Disruptionskriterien ermittelt, ab dem bei geeigneten Randbedingungen ein neuartiges Fahrzeugkonzept zu einer Disruption werden könnte.

6.2.1 Disruptives Potenzial verschiedener Fahrzeugklassen

Zunächst wird ermittelt, bis zu welchem Grad die potenziell disruptiven Fahrzeugkonzepte (PDFK) die Disruptionskriterien aus Tabelle 4.8 erfüllen. Die Bewertung des Kriteriums D03 „Geschäftsmodelländerung“ wird durch die Synthese der Einsatzszenarien (Kapitel 5.3) unterstützt, D08 „Initiale Leistungsnachteile“ durch die Erkenntnisse der Nutzenanalyse (Kapitel 5.2), D09 „Vorteile bei neuen Leistungskriterien“ durch die RCO- und LCA-Analyse (Kapitel 5.5 und 5.6) und D12 „Technologische Diskontinuität“ durch die Untersuchung der prospektiven Technologieverfügbarkeit in Kapitel 6.1. Die Ergebnisse sind im Anhang in Tabelle M.4 dargestellt, wobei Tabelle M.3 die Begründungen für die Bewertungen umfasst.

Im Folgenden wird das Vorgehen bei der Bewertung exemplarisch für 3 der 15 Kriterien dargestellt.

- Eigentumsverhältnisse (D01): Die on-the-road modularen Fahrzeugkonzepte iMod und U-Shift bieten die Möglichkeit, dass unterschiedliche Akteure die Fahr- und Transporteinheiten getrennt voneinander besitzen können.

⁴⁸ on-the-road integral (otri): fahrerloser Status quo (otri-ci*: RoboVan), flexible mover (otri-fm: Flex), integral mover (otri-im: Mover); on-the-road modular (otrm): infrastructure-based modular (otrm-ibm: iMod), standalone modular (otrm-sam: U-Shift)

⁴⁹ Van als batterieelektrisch angetriebenes Status quo-Fahrzeugkonzept stellt die Referenz für die Bewertung der PDFK dar.

Perspektivisch könnten Fahreinheiten im Besitz von Flottenbetreibern, gewerblichen Instanzen oder Privatpersonen sein und bei Nichtnutzung als Transport-as-a-Service an Akteure vermietet werden, die eine Transporteinheit mit Gütern oder Personen bewegen wollen. Bei Flex können einzelne Module ebenfalls verschiedene Eigentümer haben und zu physischen Platoons gekoppelt werden, um so größere Transporteinheiten zu bilden. Bei den anderen Fahrzeugkonzepten ändern sich die Eigentumsverhältnisse gegenüber dem Status quo voraussichtlich kaum, da sowohl RoboVan als auch Mover integrale Einheiten wie Van (Status quo) darstellen.

- Etablierte Konkurrenz (D10): Das RoboVan-Fahrzeugkonzept (fahrerloser Status quo) wird von etablierten OEM und Zulieferern vorangetrieben. Für integrale Mover und on-the-road modulare Fahrzeugkonzepte haben einige etablierte Unternehmen bereits Ideen, Konzeptstudien oder reale Demonstratoren vorgestellt (Anhang C). Für die Flex-Fahrzeugklasse ist dies dagegen bislang nicht erfolgt. Je weniger die etablierten Unternehmen das PDFK beachten, desto höher ist entsprechend Christensen (2013) dessen disruptives Potenzial [29].
- Infrastrukturabhängigkeit (D13): Alle fahrerlosen Fahrzeugkonzepte benötigen für die Automatisierung eine Absicherung im Backend sowie eine Kommunikationsinfrastruktur für den Austausch mit diesem. RoboVan-Fahrzeuge sind kompatibler mit der bestehenden physischen Infrastruktur (z. B. Laderampen oder Stellplatzgröße) als Flex-, Mover-, iMod- und U-Shift-Alternativen, da sie Van-Fahrzeugen sehr ähnlich sind (Status quo). iMod-Konzepte benötigen zusätzliche Infrastruktur für den Wechsel von Transporteinheiten.

In Tabelle 6.1 ist das ermittelte disruptive Potenzial für die 3 Kriterien dargestellt. Die Höhe der Wertungen ergeben sich aus den genannten Begründungen in Kombination mit der Operationalisierung der Disruptionskriterien in Tabelle M.2.

Tabelle 6.1: Disruptives Potenzial für ausgewählte Kriterien (D01, D10, D13)
 Die Wertungen der übrigen Kriterien sind in Tabelle M.4 dargestellt, die Begründungen in Tabelle M.3

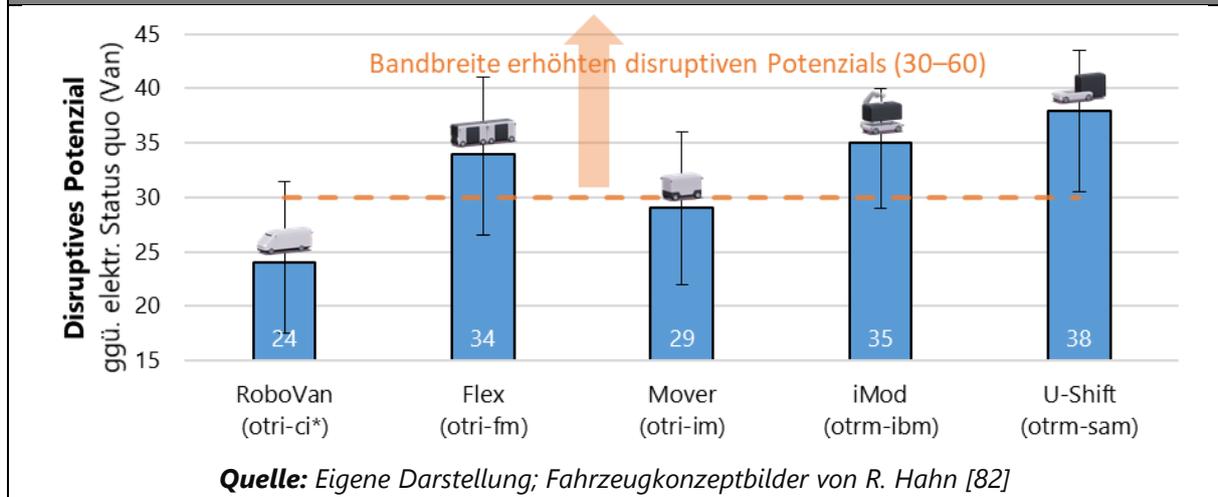
Kriterium	RoboVan 	Flex 	Mover 	iMod 	U-Shift 
D01: Eigentumsverhältnisse	0	2	0	4	4
D10: Etablierte Konkurrenz	0	3	1	2	2
D13: Infrastrukturabhängigkeit	3	2	2	0	2

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Die Summe der Erfüllungsgrade aus Tabelle M.4 ergibt gemäß Formel (4.24) **das disruptive Potenzial der Fahrzeugkonzepte** in Abbildung 6.5. Die Bewertung erfolgt dabei im Vergleich zu dem batterieelektrisch betriebenen Status quo (Van)⁵⁰. Das höchste disruptive Potenzial, das in der Bewertung erreicht werden kann, beträgt bei 15 Kriterien und dem Intervall [0,4] 60. Der in Kapitel 4.6.3 eingeführte Grenzwert beträgt 30. D. h., erst wenn ein PDFK in allen Kriterien durchschnittlich die Punktzahl 2 erreicht, ist dessen disruptives Potenzial hoch genug, um bei günstigen Randbedingungen prospektiv eine Disruption zu bewirken.

⁵⁰ Wird die Bewertung des disruptiven Potenzials für Van gegenüber des Status quos mit Verbrennungsmotor durchgeführt, ergibt diese Methodik einen Wert von 18. D. h., RoboVan hat mit einer Wertung von 24 ein höheres disruptives Potenzial gegenüber dem elektrischen Status quo (Van) als die E-Mobilität gegenüber dem verbrennungsmotorischen Pendant. Strathmann (2019) attestiert der E-Mobilität ebenfalls disruptives Potenzial [316, S. 29–30], die Literatur ist sich aber uneinig, ob sie ein disruptives Ereignis darstellt (Kapitel 4.6.1).

Abbildung 6.5: Disruptives Potenzial neuartiger Fahrzeugkonzepte – Ergebnis der Bewertung
Best und worst case Szenarien, dargestellt als Erwartungsbereich um deren Mittelwert; Datengrundlage in Tabelle M.4



Flex, iMod und U-Shift überschreiten den Grenzwert disruptiven Potenzials. D. h., diese Fahrzeugklassen sind bei geeigneten Randbedingungen dazu geeignet, den elektrisch angetriebenen Status quo zu verdrängen. Die modularen Fahrzeugkonzepte zeigen insbesondere bei den Kriterien zu geänderten Eigentumsverhältnissen und Geschäftsmodellen ein hohes disruptives Potenzial. Dagegen bedarf der fahrerlose Status quo (RoboVan) einen geringen organisatorischen, technischen und infrastrukturellen Umstellungsaufwand, was sich günstig auf das disruptive Potenzial auswirkt.

Die Argumente, die den Bewertungen zugrunde liegen, beziehen sich auf komplexe systemische Zusammenhänge im Umfeld der Fahrzeugindustrie und des urbanen Wirtschaftsverkehrs und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die **Unsicherheit der Bewertung** wird entsprechend Kapitel 4.6.3 berechnet und in Abbildung 6.5 durch Erwartungsbereiche um deren Mittelwert dargestellt: die Bewertung kann zwischen best case und worst case um den most likely case variieren.

Im best case erreichen auch die beiden anderen on-the-road integralen Fahrzeugklassen RoboVan und Mover den Bereich erhöhten disruptiven Potenzials. Die modularen Fahrzeugkonzepte U-Shift und iMod liegen auch im worst case noch in derselben Größenordnung wie Mover im most likely case und RoboVan im best case. iMod

unterschreitet dabei allerdings den Grenzwert, sodass in diesem Fall eher eine Koexistenz mit dem Status quo erwartet werden kann als dessen Verdrängung. U-Shift hat auch im worst case noch ein erhöhtes disruptives Potenzial.

6.2.2 Zusammenfassung und Grenzen des Vorgehens

Anhand von geeigneten Kriterien wurde das disruptive Potenzial neuartiger Fahrzeugkonzepte bewertet. Das höchste Potenzial erreichen standalone modulare Fahrzeugkonzepte (z. B. U-Shift). Infrastrukturbasierte modulare Konzepte und flexible Mover folgen mit marginal geringerem Potenzial.

Mit dem erarbeiteten Bewertungswerkzeug kann das disruptive Potenzial neuartiger Fahrzeugkonzepte frühzeitig erkannt, kontinuierlich überwacht und geänderte Rahmenbedingungen, neue Kundenbedürfnisse und fahrzeugtechnische Entwicklungen berücksichtigt werden. Die Qualität der Aussagen wird weiter erhöht, wenn die Bewertung der Kriterien von mehreren Fachexpertinnen und -experten vorgenommen wird. Ex-ante Untersuchungen werden aber stets Unsicherheiten unterliegen und sind als vereinfachender Ausblick in künftige Marktentwicklungen zu interpretieren.

Führt die Einführung eines neuen Fahrzeugkonzepts nicht zu einer Disruption, kann sich das Fahrzeugkonzept trotzdem erfolgreich am Markt etablieren, z. B. in einer Koexistenz mit dem etablierten Status quo.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Forschungsfragen (**FF1–FF5**) aus Kapitel 1.2 werden anhand einer Zusammenfassung der erarbeiteten Erkenntnisse beantwortet. Anschließend wird aufgezeigt, wie diese Arbeit das Forschungsfeld erweitert und welche weiterführenden Arbeiten empfohlen werden.

7.1 Zentrale Ergebnisse

Die Arbeit wurde durch die Vielzahl neuartiger Fahrzeugkonzepte motiviert, die für den urbanen Transport entwickelt wurden. Ziel der Arbeit war es daher, ein Modell zu erarbeiten, mit dem on-the-road integrale sowie modulare Fahrzeugkonzepte für den urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehr ganzheitlich bewertet werden können.

Zunächst wurden die am Markt bekannten neuartigen Fahrzeugkonzepte nach ihrem Einsatzzweck und der Art ihrer Modularisierung und Flexibilisierung systematisiert (Kapitel 2). Dazu wurde eine neue **Fahrzeugklassifizierung** für on-the-road integrale und modulare Konzepte eingeführt (**FF1**). Diese unterscheidet die folgenden Klassen (mit generischen Vertretern für den Einsatz im urbanen Wirtschaftsverkehr): conventional integral (Van  sowie RoboVan  als fahrerloses Pendant zum Van), flexible mover (Flex ) , integral mover (Mover ) , infrastructure-based modular (iMod ) und standalone modular (U-Shift ). Alle Fahrzeugkonzepte sind mit einem elektrischen Antriebsstrang konzipiert und mit Ausnahme des Status quos fahrerlos.

Eine zentrale Erkenntnis aus der Analyse der Fahrzeugkonzepte ist, dass diese die bisherigen Betriebsabläufe im Wirtschaftsverkehr verändern. Deshalb wurde in Kapitel 3 das Umfeld urbaner Personen- und Güterwirtschaftsverkehre charakterisiert und die Kombination dieser beiden Bereiche eingehend untersucht. Aus dieser Betrachtung wurde ein **morphologischer Kasten** entwickelt, welcher aus verschiedenen Ausprägungen von Betreiber- und Logistikkonzepten sowie Einsatzzwecken besteht.

Entwicklung eines ganzheitlichen Bewertungsmodells

Für die Bewertung der neuartigen Fahrzeugkonzepte wurde ermittelt, dass eine Flottenbetrachtung anhand eines Einsatzszenarios erfolgen muss, um systemische Effekte durch unterschiedliche Modularisierungs- und Flexibilisierungsstrategien zu berücksichtigen. Hierzu wurde ein neues, **multikriterielles Bewertungsmodell** in Kapitel 4 erarbeitet (**FF2**), welches aus den folgenden methodischen Teilelementen besteht:

- Im ersten Schritt wird ein Anwendungsfall mit seinen Transportbedarfen und Randbedingungen definiert. Der in Kapitel 3 entwickelte morphologische Kasten wird mit den Eigenschaften der Fahrzeugkonzepte abgeglichen, um hieraus **Einsatzszenarien** abzuleiten. Unter Verwendung eines modifizierten Continuum-Approximation-Ansatzes sowie Monte-Carlo-Simulationen werden anschließend verkehrliche Kennzahlen der Einsatzszenarien quantifiziert.
- Eine **Nutzenanalyse** erfasst qualitative sowie quantitative Kriterien zur Bewertung der verschiedenen Fahrzeugkonzepte. Aus der Literatur sowie aus Workshops wurden relevante Nutzenkriterien identifiziert und in einer Online-Befragung von Expertinnen und Experten validiert sowie priorisiert. Mittels Methoden der Nutzwertanalyse und des analytischen Hierarchieprozesses (AHP) werden die Nutzwerte der Fahrzeugalternativen bestimmt. Die Kriteriengewichtungen und Paarvergleiche werden gedämpft sowie überhöht, um die Bandbreite und die Sensitivität der Ergebnisse aufzuzeigen.
- Die Methode der **Relevant Cost of Ownership** (RCO) wird auf eine Flottenbetrachtung erweitert. Dabei müssen nicht nur verschiedene Fahreinheiten berücksichtigt werden, sondern bei modularen Konzepten zusätzlich auch Transporteinheiten. Außerdem werden Kosten für erforderliche Infrastruktur in die RCO-Berechnung inkludiert. Da die Fahr- und Transporteinheiten unterschiedliche Haltedauern besitzen, werden systemische RCO p. a. berechnet. Sensitivitätsanalysen und Break-Even-Rechnungen werden anhand variiertter Eingangsgrößen durchgeführt.

- Eine **Ökobilanzierung** nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 wird sowohl auf integrale als auch auf modulare Fahrzeuge angewendet, wobei eine Flottenbetrachtung systemische Effizienzvorteile berücksichtigt. Jede Fahr- und Transporteinheit des Produktsystems wird zunächst gesondert modelliert und anhand der unterschiedlichen Lebensdauern auf einen gemeinsamen Referenzfluss skaliert. Sensitivitätsanalysen erfolgen über eine Szenarienbetrachtung.
- Für die Analyse der **prospektiven Technologieentwicklung** neuartiger Fahrzeugkonzepte werden Expertinnen und Experten nach der Technologie befragt, welche die Marktreife der Fahrzeuge am stärksten verzögert. Für diesen kritischen Technologiebereich wird in einer Kombination aus Publikationsanalyse und Delphi-Expertenbefragung die zeitliche Entwicklung von Funktionen und zugehörigen Technologien ermittelt. Ein Abgleich von funktionaler und technologischer Roadmap deckt mögliche Diskrepanzen bei der zeitlichen Entwicklung auf und erlaubt eine Ableitung der prospektiven Marktreife.
- Zuletzt wird das Bewertungsmodell um ein Vorgehen ergänzt, mit dem das **disruptive Potenzial** neuartiger Fahrzeugkonzepte ermittelt wird. Die für den Fahrzeugbereich relevanten Kriterien wurden aus der Disruptionstheorie und Betrachtungen historischer Disruptionen identifiziert. Die potenziell disruptiven Fahrzeugkonzepte werden gegenüber des Status quos vergleichend anhand der Disruptionskriterien bewertet und Bandbreiten ihres disruptiven Potenzials ermittelt.

Anwendung des Bewertungsmodells

Das entwickelte Bewertungsmodell wurde beispielhaft für die Vertreter der Fahrzeugklassen Van, RoboVan, Flex, Mover, iMod und U-Shift in der Referenzanwendung S-Vaihingen angewendet (Kapitel 5 und 6).

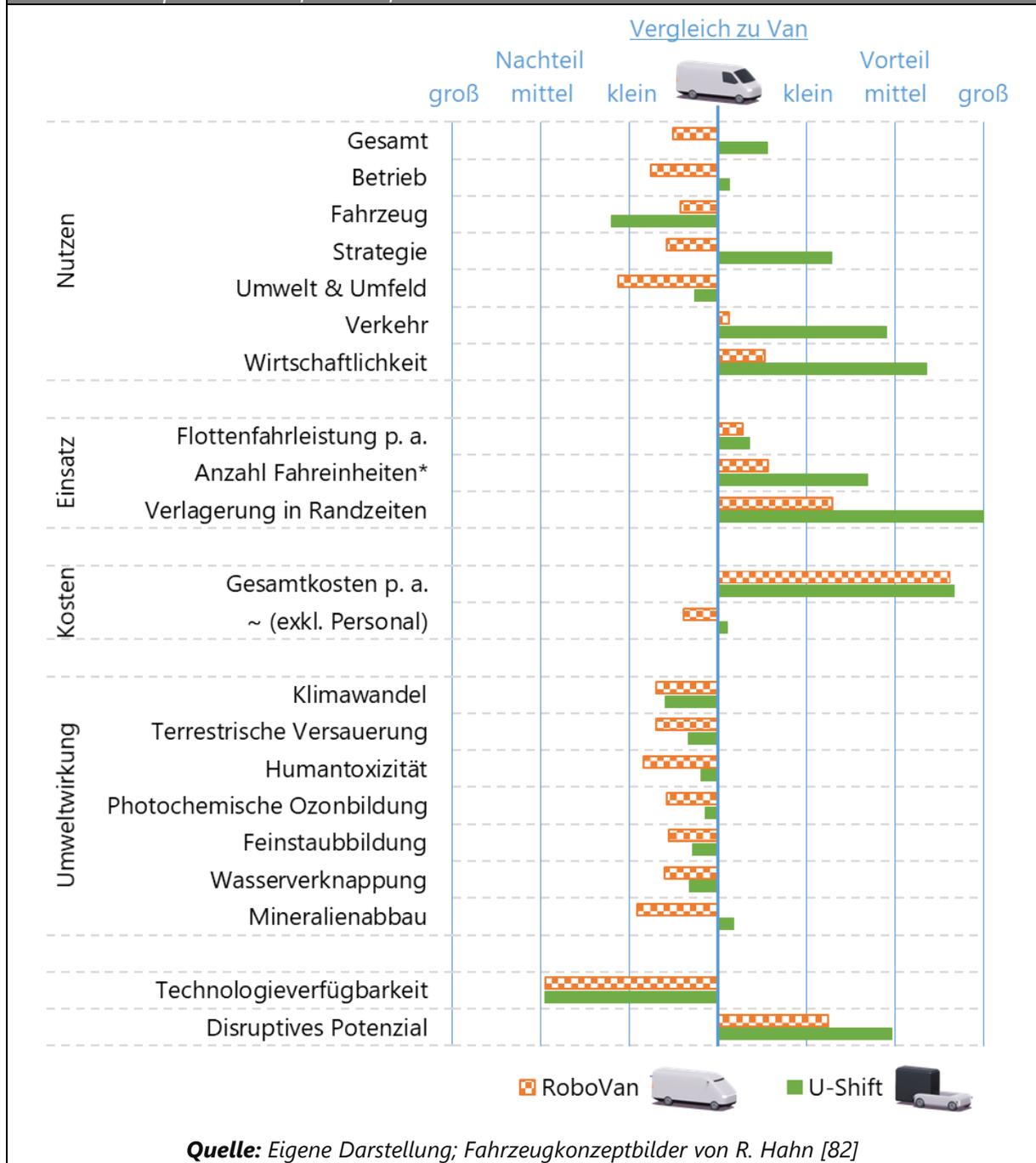
Dazu wurde zunächst die **Referenzanwendung S-Vaihingen** erarbeitet und quantifiziert. Die Anwendung berücksichtigt Personentransporte im Demand Responsive

Transport (DRT), Gütertransporte in der Citylogistik sowie Paketlieferungen im KEP-Segment. Deren Transportbedarfe wurden aus Verkehrsmodellen, statistischen Daten und einer GIS-Analyse abgeleitet, bei der die Datenbank OpenStreetMap softwaregestützt ausgewertet wurde. Anschließend wurden geeignete Betriebsprozesse der Fahrzeugkonzepte erarbeitet.

Anschließend wurden in der **Nutzenanalyse** alle Fahrzeugvertreter unter Berücksichtigung ihres Einsatzes in der Referenzanwendung vergleichend bewertet. Im Ergebnis erreicht das Fahrzeugkonzept U-Shift den höchsten Gesamtnutzen gefolgt von iMod und Van. Eine Betrachtung der einzelnen Kategorienutzwerte ergibt differenzierte Ergebnisse: In der Kategorie Betrieb haben U-Shift und Van die höchsten Werte, gefolgt von RoboVan und Flex. In der Kategorie Fahrzeug wurden sicherheitsrelevante Kriterien in der Online-Befragung am höchsten gewichtet. Bei diesen Kriterien erreichen die integralen Konzepte Van, RoboVan und Mover höhere Wertungen als die anderen Fahrzeugalternativen. In den Kategorien Strategie, Verkehr und Wirtschaftlichkeit führen die on-the-road modularen Fahrzeugkonzepte U-Shift und iMod die Rangfolge deutlich an, während Van in der Kategorie Umwelt & Umfeld den höchsten Kategorienutzwert erzielt. Der zusätzliche Flächenbedarf durch abgestellte Transporteinheiten wird als Nachteil der modularen Konzepte für die Nutzenkategorie Umwelt & Umfeld bewertet.

U-Shift weist den höchsten Gesamtnutzen auf und wurde deshalb zusätzlich bezüglich Einsatzszenario, Kosten und Umweltwirkungen detailliert analysiert und mit dem Status quo (Van) sowie dessen fahrerlosem Pendant (RoboVan) verglichen. Abbildung 7.1 zeigt die aggregierten Ergebnisse für den Einsatz von U-Shift und RoboVan in der Referenzanwendung S-Vaihingen, im Vergleich zu den Ergebnissen für Van.

Abbildung 7.1: Aggregiertes Ergebnis der ganzheitlichen Bewertung von Van, RoboVan und U-Shift
 Ergebnisse für den Einsatz der drei Fahrzeugalternativen in der Referenzanwendung S-Vaihingen im Basisfall der in dieser Arbeit getroffenen Annahmen; weitere Ergebnisse in den jeweiligen Kapiteln; *zusätzliche Transporteinheiten für U-Shift im Verhältnis von ca. 9:1



Die Quantifizierung der **Einsatzszenarien** ergab, dass U-Shift durch die Modularisierung weniger Fahreinheiten (21) benötigt als Van (48) und RoboVan (39). Für den U-Shift-Betrieb sind in dieser Referenzanwendung jedoch zusätzlich Transporteinheiten im Verhältnis von ca. 9:1 erforderlich, um die definierten Betriebskonzepte bedienen zu

können. Im U-Shift-Betrieb kann die Fahrleistung in Randzeiten entzerrt und Tagesspitzen im Vergleich zu Van und RoboVan verringert werden: ca. 40 % der Fahrleistung von U-Shift entsteht zwischen 18 und 6 Uhr, bei Van dagegen nur 10 % und bei RoboVan 20 %. Die U-Shift-Fahreinheiten haben einen um ca. 35 % bzw. 40 % geringeren Ruhezeitanteil als die RoboVan-, respektive Van-Fahrzeuge. Die potenzielle Verkehrs-entzerrung im U-Shift-Betrieb verbessert die Verkehrssituation erheblich, indem das Staurisiko zu Stoßzeiten reduziert wird. Die Ergebnisse der Einsatzszenarien werden zudem für die Berechnung der Gesamtkosten sowie der Ökobilanz benötigt.

Die systemischen **Gesamtkosten** p. a. des Van-Betriebs werden mit ca. 90 % maßgeblich von den Kosten für das Fahrpersonal beeinflusst, wie auch in der Literatur ermittelt wurde. Dadurch ergibt sich ein signifikanter Kostenvorteil der fahrerlosen Konzepte RoboVan und U-Shift gegenüber Van, wobei der U-Shift-Einsatz wiederum mit ca. 15 % nochmals deutlich kostengünstiger ist als der RoboVan-Betrieb. Dies gilt für den kombinierten Anwendungsfall in S-Vaihingen. Ein ausschließlicher Einsatz von U-Shift im Personentransport wird hingegen als wirtschaftlich nicht sinnvoll angesehen, da hierzu ebenso viele Transport- wie Fahreinheiten erforderlich sind. Durch die zusätzliche Nutzung der kostenintensiven U-Shift-Fahreinheiten in weiteren Anwendungen des Gütersegments verteilen sich die Kosten vorteilhaft. Für den Einsatz von on-the-road modularen Fahrzeugkonzepten wie U-Shift wird daher eine gleichzeitige Nutzung in mehreren Güteranwendungen oder in einer Kombination mit Personentransporten empfohlen, wobei sich die Betriebszeiten der Einsatzzwecke möglichst wenig überschneiden (**FF3**).

Die **Ökobilanz** wurde für alle 18 Wirkkategorien⁵¹ der ReCiPe-Methode durchgeführt, wobei Van für die meisten Wirkkategorien weniger Emissionen verursacht als die fahrerlosen Alternativen. Dies ist auf die zusätzlichen Komponenten und einen erhöhten

⁵¹ In Abbildung 7.1 sind 7 der 18 Wirkkategorien dargestellt, wobei die Auswahl besonders relevanter Wirkkategorien einer für die EU entwickelten LCA-Methodik für Nutzfahrzeuge [279] folgt.

Energieverbrauch für die Automatisierung zurückzuführen. Die in der Produktionsphase entstehenden Treibhausgase sind bei RoboVan zu ca. 25 % durch Automatisierungskomponenten verursacht und zu ca. 20 % durch die Traktionsbatterie. Der U-Shift-Betrieb weist in 12 der 18 Wirkkategorien eine um mindestens 5 % verringerte Umweltbelastung auf als die RoboVan-Flotte. Die geringe Anzahl von U-Shift-Fahrerheiten und deren effizienter Einsatz können die zusätzlichen Transporteinheiten sowie höhere Fahrzeugmasse aufgrund der Modularisierung kompensieren.

Diesen Analysen folgten in Kapitel 6 prospektive Untersuchungen zur Technologieentwicklung und zum disruptiven Potenzial der Fahrzeugkonzepte.

In einer Expertenbefragung wurde die Automatisierung empirisch als kritischer Technologiepfad identifiziert. Deshalb wurde auf diese die kombinierte Methode zur prospektiven Bestimmung der **Technologiereife** angewendet. Die Publikationsanalyse ergab, dass die Automatisierungsstufe SAE Level 5 (fahrerloser Betrieb) voraussichtlich im Jahr 2030 marktreif ist. In der zweistufigen Delphi-Befragung dieser Arbeit wurden die Reifegrade von ca. 60 Technologien für automatisiertes Fahren durch Expertinnen und Experten bestimmt. Der Abgleich der so entwickelten technologischen und der funktionalen Roadmap zeigt, dass einige Technologien, die die Perzeption deutlich verbessern, erst nach 2030 marktreif sind, sodass ein vollständiger Markteintritt von SAE Level 5 für die untersuchten fahrerlosen Fahrzeugkonzepte erst im Jahr 2035 als realistisch erachtet wird. Für viele Einsatzzwecke reicht SAE Level 4 jedoch aus, welches entsprechend der Analyse voraussichtlich zwischen 2025 und 2030 marktreif ist (**FF4**).

In die Analyse des **disruptiven Potenzials** wurden die Erkenntnisse aus den vorherigen Bewertungsschritten einbezogen. Unter Anwendung der erarbeiteten Methode übersteigen U-Shift, iMod und Flex den Grenzwert zu erhöhtem disruptiven Potenzial, d. h. sie könnten unter geeigneten Randbedingungen den Status quo (Van) aus dem Markt urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehrs verdrängen oder zumindest zurückdrängen (**FF5**). Eine ex-ante Analyse ist stets mit Unsicherheiten verbunden, weshalb die Bewertung in regelmäßigen Abständen wiederholt und überprüft werden muss.

Die Ergebnisse stellen den Basisfall für die in dieser Arbeit getroffenen Annahmen dar, wobei in Parametervariationen, Monte-Carlo-Simulationen, Break-Even-Rechnungen und Best-/ Worst-Case-Betrachtungen die Bandbreite und die Sensitivität der Resultate aufgezeigt wurde. Die Plausibilität der Ergebnisse wurde durch Literaturvergleiche bestätigt.

Aus der initialen Bewertung der Fahrzeugkonzepte anhand der Referenzanwendung S-Vaihingen leiten sich insbesondere für das on-the-road modulare Fahrzeugkonzept U-Shift verschiedene Empfehlungen für die weitere **Fahrzeugentwicklung** ab:

- Die Crash- und Gefährdungsrisiken durch die Trennung von Fahr- und Transporteinheit im Betrieb müssen weiter minimiert werden.
- On-the-road modulare Fahrzeugkonzepte haben durch die Modularisierung eine höhere Masse als integrale Alternativen. Es wird daher empfohlen, insbesondere für die Transporteinheiten, deren Masse z. B. durch Leichtbau-Technologien zu reduzieren. Weiteres Potenzial zur Verbesserung der Ökobilanz wird im Einsatz umweltverträglicher Materialien gesehen, insbesondere in der Personen-Transporteinheit.
- Die Einführung fahrerloser Fahrzeuge reduziert die Kosten gegenüber Alternativen mit Fahrpersonal signifikant, erhöht jedoch die Umweltbelastung. Die Fahrzeugautomatisierung sollte daher grundsätzlich und auf den jeweils erforderlichen Einsatzzweck optimiert werden, um unnötige Komponenten zu vermeiden und den Energieverbrauch zu begrenzen: z. B. kann SAE Level 4 in vielen Anwendungsfällen ausreichend sein.
- Weiterhin werden Untersuchungen empfohlen, um das Optimum einer Verlagerung der Automatisierungskomponenten Perzeption und Trajektorienplanung aus dem Fahrzeug in die Infrastruktur zu ermitteln.

7.2 Neuartigkeit und wissenschaftlicher Mehrwert

Diese Arbeit ermöglicht erstmals eine ganzheitliche Bewertung neuartiger Fahrzeugkonzepte im urbanen Personen- sowie Güterwirtschaftsverkehr und umfasst im Einzelnen die folgenden Beiträge zum Forschungsfeld:

- Die neu erarbeitete **Klassifizierung** für on-the-road integrale sowie on-the-road modulare Fahrzeugkonzepte erfasst neben einem Fahrzeugeinsatz in der Personen- oder Güterbeförderung auch eine kombinierte Nutzung sowie unterschiedliche Flexibilisierungs- und Modularisierungsstrategien.
- In der vorliegenden Arbeit wurde ein neues Näherungsmodell entwickelt, das die räumliche Verteilung von Transportbedarfen in einem Untersuchungsgebiet sowie deren **Disposition** auf verschiedene Fahrzeugklassen ermöglicht, unter Berücksichtigung unterschiedlicher logistischer Prozesse in der Personen- und Güterbeförderung. Dieses Vorgehen liefert unter Verwendung der Continuum-Approximation-Methode belastbare verkehrliche Kenngrößen.
- Der empirisch ermittelte Kriterienkatalog umfasst 51 Kriterien in 6 Kategorien, die für die **Nutzenbewertung** neuartiger Fahrzeugkonzepte im urbanen Personen- und Güterwirtschaftsverkehr relevant sind. Die Gewichtung der Kriterien und die Vollständigkeit des Kriterienkatalogs wurden durch Expertinnen und Experten verschiedener Stakeholder in einer Online-Befragung bewertet und bestätigt.
- Die neu entwickelte Methodik zur systemischen **Gesamtkostenbetrachtung** auf Basis des RCO-Ansatzes berücksichtigt nicht nur einzelne Fahrzeuge, sondern auch ergänzende Transporteinheiten und Infrastrukturelemente. Unterschiedliche Haltedauern der Einheiten werden dabei durch den Bezug auf ein Systemreferenzjahr berücksichtigt. Damit können Veränderungen der Flottenzusammensetzung, der Infrastruktur und der Betriebsprozesse erfasst werden, die durch die Einführung neuer Fahrzeugkonzepte entstehen.

- Das in dieser Arbeit entwickelte **Ökobilanzmodell** ermöglicht erstmals eine konsistente Bewertung sowohl on-the-road integraler als auch on-the-road modularer Fahrzeugkonzepte, indem Fahr- sowie Transporteinheiten in einem Produktsystem erfasst werden. Durch die Skalierung der Massen der Einheiten anhand ihrer Lebensdauer und den Bezug der funktionellen Einheit auf neutrale Fahrzeugkilometer können heterogene Flotten, bestehend auf Fahr- und Transporteinheiten, die zugleich in der Personen- und Güterbeförderung im Einsatz sind, bilanziert werden.
- Zur Ermittlung **prospektiver Technologieentwicklungen** werden erstmalig funktionale Roadmaps auf Basis von Publikationsanalysen und empirisch in einer Delphi-Befragung ermittelte technologische Roadmaps zu einer Gesamt-Roadmap verknüpft. In dieser können Abhängigkeiten aufgedeckt und damit prognosebedingte Unsicherheiten reduziert werden. Darüber hinaus wurde das fahrerlose Fahren empirisch als kritischer Technologiepfad für neuartige Fahrzeugkonzepte identifiziert.
- Die Arbeit liefert einen neuartigen Ansatz zur Quantifizierung des **disruptiven Potenzials** neuartiger Fahrzeugkonzepte. Basierend auf der Disruptionstheorie wurde hierfür ein bisher fehlender Kriterienkatalog entwickelt und empirisch validiert. Ein Grenzwert erhöhten disruptiven Potenzials wurde eingeführt, welcher Fahrzeugkonzepte identifiziert, die unter geeigneten Randbedingungen den Status quo prospektiv verdrängen können.
- Das entwickelte Bewertungsmodell basiert auf einer umfassenden Methodik und kann auch bei der vergleichenden Bewertung von **Geschäftsmodellen** im urbanen Personen- und Güterverkehr eingesetzt werden, um verschiedene Dimensionen wie Kosten, Umweltwirkung oder technologische Einsatzreife zu untersuchen. Dadurch kann z. B. geprüft werden, ob ein kombinierter Personen- und Gütertransport mit neuartigen Fahrzeugen in einem Anwendungsgebiet vorteilhaft gegenüber einem reinen Personen- oder Gütertransport ist, sowie

welches Fahrzeugkonzept für ein gewähltes Betriebsszenario am besten geeignet ist.

Erstmals wurden neuartige, on-the-road modulare Fahrzeuge anhand all dieser Dimensionen für eine Referenzanwendung bewertet. Mit dem entwickelten Bewertungsmodell können nun Fahrzeugkonzepte unterschiedlicher Flexibilisierungs- und Modularisierungsstrategien für verschiedene Anwendungsfälle multikriteriell und konsistent vergleichend bewertet werden.

7.3 Gültigkeitsbereich der Ergebnisse und weiterer Forschungsbedarf

Im Folgenden werden die Limitationen der Erkenntnisse dieser Arbeit diskutiert und Bedarfe für weiterführende Forschungsaktivitäten abgeleitet.

Die Betrachtungsgrenzen der definierten Referenzanwendung sind ein urbaner Bezug und ein nationaler Fokus auf deutsche Randbedingungen. Die Bewertung sollte anhand weiterer Anwendungsfälle in nationalen und internationalen Klein- und Großstädten erfolgen, um die globale Nachfrage nach neuartigen Fahrzeugen zu ermitteln und Empfehlungen für die Fahrzeugentwicklung verallgemeinern zu können. Eine Kopplung des erarbeiteten Bewertungsmodells mit mikroskopisch aufgelösten Nachfragemodellen verschiedener Quartiere wird hierzu empfohlen.

Simulative Ansätze zur Optimierung der Flottendisposition on-the-road modularer Fahrzeugkonzepte, die aktuell in der Literatur erarbeitet werden (Kapitel 1.1), könnten die Belastbarkeit der für die Bewertung notwendigen Kennzahlen der Einsatzszenarien weiter erhöhen. Die Simulationsergebnisse sollten daher in weiteren Arbeiten mit dem entwickelten Bewertungsmodell verknüpft werden.

Die Paarvergleiche in der Nutzenbewertung berücksichtigen methodenbedingt bereits eine Konsistenzprüfung der Ergebnisse. Für künftige Arbeiten wird eine Durchführung der Paarvergleiche mit mehreren unabhängigen Expertinnen und Experten empfohlen, um die Ergebnisse zusätzlich abzusichern.

In der RCO-Analyse werden keine Erlöse berücksichtigt. Die sich durch die Einführung von neuartigen Fahrzeugkonzepten ändernden Betriebskonzepte könnten aber die Zahlungsbereitschaft der Kundinnen und Kunden beeinflussen, sodass Akzeptanzstudien empfehlenswert sind. Energiespeicher in Transporteinheiten von on-the-road modularen Fahrzeugkonzepten könnten während ihrer inaktiven Phasen in das Energienetz für netzdienliches Laden integriert werden. Eine monetäre Bewertung dieser Option wird empfohlen.

Die Ökobilanzierung sollte durch eine Betrachtung der Kreislauffähigkeit der Produktsysteme erweitert werden, um den Einfluss einer verbesserten Ressourcennutzung auf die Umweltwirkung der Fahrzeugkonzepte zu vergleichen.

Prospektive Bewertungen, wie insbesondere Prognosen zur Technologieentwicklung und zum disruptiven Potenzial, müssen regelmäßig wiederholt und überprüft werden, da sich der Entwicklungs- und Wissensstand sowie Randbedingungen kontinuierlich verändern.

Das Bewertungsmodell wurde exemplarisch für Einsatzszenarien in S-Vaihingen angewendet. Die Ergebnisse der Bewertung gelten daher für diese konkrete Situation und die getroffenen Annahmen. Das Bewertungsmodell wurde jedoch unabhängig von spezifischen Fahrzeugen und Anwendungen entwickelt und kann daher auch zur Bewertung von Fahrzeugkonzepten in anderen Anwendungsfällen verwendet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Vereinte Nationen, „World Urbanization Prospects: The 2018 Revision“. Key facts, United Nations Economic & Social Affairs, 2018.
- [2] Europäische Kommission, „A call to action on urban logistics: Commission staff working document“, Brüssel, 2013.
- [3] International Transport Forum (ITF), *ITF Transport Outlook 2021*. Paris: OECD Publishing, 2021.
- [4] M. Savelsbergh und T. van Woensel, „50th Anniversary Invited Article - City Logistics: Challenges and Opportunities“, *Transportation Science*, Jg. 50, Nr. 2, S. 579–590, 2016, doi: 10.1287/trsc.2016.0675.
- [5] R. Bogdanski, *Nachhaltige Stadtlogistik*. Huss-Verlag, 2019.
- [6] B. Leerkamp, A. Thiemermann, M. Schlott, T. Holthaus, W. Aichinger und P. Wittenbrink, „Liefen ohne Lasten“, 2020.
- [7] Europäische Kommission, „Fahrplan zu einem einheitlichen europäischen Verkehrsraum: Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem“, Brüssel, Weißbuch KOM/2011/0144 endg., 2011.
- [8] S. Anderson, J. Allen und M. Browne, „Urban logistics—how can it meet policy makers’ sustainability objectives?“, *Journal of Transport Geography*, Jg. 13, Nr. 1, S. 71–81, 2005, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2004.11.002.
- [9] H.-P. Kienzler, A. Auf der Maur, S. Altenburg, K. Esser und J. Kurte, „Marktanalyse urbaner Wirtschaftsverkehr in Deutschland“, KE-CONSULT Kurte&Esser GbR; Prognos AG; Now GmbH, 2019.
- [10] C. Deckert, *CSR und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021.
- [11] H. Flämig *et al.*, „ATLaS: Projektbericht des Verbundvorhabens“, Technische Universität Hamburg (TUHH); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR); DroneMasters Boost GmbH; Logistiknetz Berlin-Brandenburg, Hamburg, 2020.
- [12] K.-O. Schocke, J. Becker, S. Henninger, C. von Viebahn und M. auf der Landwehr, „Kombinom: Datenmodellierung für den Einsatz von autonomen Kleinbussen im ländlichen Raum zum kombinierten Transport von Personen und Gütern“, Frankfurt University of Applied Sciences; Hochschule Hannover, 2021.
- [13] J. Hatzenbühler, E. Jenelius, G. Gidófalvi und O. Cats, „Multi-purpose Pickup and Delivery Problem for Combined Passenger and Freight Transport: Preprint submitted to EURO Journal on Transportation and Logistics“, 2022.
- [14] A. Mourad, „The synchronization of shared mobility flows in urban environments“. Dissertation, Université Paris Saclay, 2019.

- [15] U. Schöffeler und J. Wichser, „Inner Urban Freight Transport and city logistics: EU-funded Urban Transport Research Project Results“, ETH Zürich, 2003.
- [16] M. Münster, „Vorgehensmodell zur Grundkonzeption eines Fahrzeugkonzepts und Entwicklung neuartiger kraftflussoptimierter Karosseriestrukturen für elektrifizierte Fahrzeuge“. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2020.
- [17] A. König, D. Telschow, L. Nicoletti und M. Lienkamp, „Package planning of autonomous vehicle concepts“, *Proc. Des. Soc.*, Jg. 1, S. 2369–2378, 2021, doi: 10.1017/pds.2021.498.
- [18] S. Schwerdfeger und N. Boysen, „Optimizing the changing locations of mobile parcel lockers in last-mile distribution“, *European Journal of Operational Research*, Jg. 285, Nr. 3, S. 1077–1094, 2020, doi: 10.1016/j.ejor.2020.02.033.
- [19] H.-H. Braess und U. Seiffert, Hg., *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [20] Rinspeed AG, *microSNAP*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.rinspeed.com/de/microSNAP_50_concept-car.html#l1 (Zugriff am: 25. Oktober 2022).
- [21] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., *U-Shift*. [Online]. Verfügbar unter: <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/u-shift> (Zugriff am: 25. Oktober 2022).
- [22] Italdesign und Airbus, *PopUp*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.italdesign.it/project/popup/> (Zugriff am: 4. November 2022).
- [23] T. S. Harrington, J. Singh Srail, M. Kumar und J. Wohlrab, „Identifying design criteria for urban system ‘last-mile’ solutions – a multi-stakeholder perspective“, *Production Planning & Control*, Jg. 27, Nr. 6, S. 456–476, 2016, doi: 10.1080/09537287.2016.1147099.
- [24] H. Krampe, H.-J. Lucke und M. Schenk, *Grundlagen der Logistik*. München: Huss-Verl., 2012.
- [25] BMVI, „Untersuchung zum Status Quo des Güterverkehrssystems in Deutschland – Metastudie“, 2016.
- [26] X. Zhang, N. Valantis Kanellos und E. Plant, „Environmental sustainability of logistics service providers: a systematic literature review on indicators for city logistics“ in *Supply chain networks vs platforms innovations, challenges and opportunities: proceedings of the 24th International Symposium on Logistics, Würzburg, Germany, 14th - 17th July 2019*, 2019.
- [27] V. Coates et al., „On the Future of Technological Forecasting“, *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 67, Nr. 1, S. 1–17, 2001, doi: 10.1016/S0040-1625(00)00122-0.

- [28] D. Lasinger, *Die Leistung vor der Innovation: Ermittlung und Nutzung schwacher Signale von Chancen*. Dissertation. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011.
- [29] C. M. Christensen, *The innovator's dilemma: Warum etablierte Unternehmen den Wettbewerb um bahnbrechende Innovationen verlieren*, 1. Aufl. München: Vahlen, 2013.
- [30] P. Klenner, S. Hüsiger und M. Dowling, „Ex-ante evaluation of disruptive susceptibility in established value networks—When are markets ready for disruptive innovations?“, *Research Policy*, Jg. 42, Nr. 4, S. 914–927, 2013, doi: 10.1016/j.respol.2012.12.006.
- [31] S. Schwerdfeger und N. Boysen, „Who moves the locker? A benchmark study of alternative mobile parcel locker concepts“, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2022.
- [32] T. Schlenker, K. Martins-Turner, J. F. Bischoff und K. Nagel, „Potential of Private Autonomous Vehicles for Parcel Delivery“, *Transportation Research Record*, Jg. 2674, Nr. 11, S. 520–531, 2020, doi: 10.1177/0361198120949878.
- [33] S. Meinhardt, T. Schlenker, K. Martins-Turner und M. Maciejewski, „Simulation of On-Demand Vehicles that Serve both Person and Freight Transport“ in *The 13th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT)*, Porto, Portugal, 2022.
- [34] J. J. A. Kortekaas, B. A. Beirigo und F. Schulte, „Beyond Cargo Hitching: Combined People and Freight Transport Using Dynamically Configurable Autonomous Vehicles“ in *Lecture Notes in Computer Science*, Bd. 14239, *Computational Logistics: 14th International Conference, ICCL 2023, Berlin, Germany, September 6–8, 2023, Proceedings*, J. R. Daduna, G. Liedtke, X. Shi und S. Voß, Hg., 1. Aufl., Cham: Springer Nature Switzerland; Imprint Springer, 2023.
- [35] I. Österle *et al.*, „Benefits and costs of shared, modular automated vehicles for freight and passenger transport: the case of U-Shift“, *Transportation Planning and Technology*, 2022, doi: 10.1080/03081060.2022.2094930.
- [36] J. Wątróbski, K. Małeckki, K. Kijewska, S. Iwan, A. Karczmarczyk und R. Thompson, „Multi-Criteria Analysis of Electric Vans for City Logistics“, *Sustainability*, Jg. 9, Nr. 8, S. 1453, 2017, doi: 10.3390/su9081453.
- [37] F. Kleiner, „Nutzfahrzeugkonzepte der Zukunft: Systemische Technologiebewertung konkurrierender Antriebskonzepte“. Dissertation, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart, 2020.
- [38] J. van Duin, B. W. Wiegman, B. van Arem und Y. van Amstel, „From home delivery to parcel lockers: a case study in Amsterdam“, *Transportation Research Procedia*, Jg. 46, S. 37–44, 2020, doi: 10.1016/j.trpro.2020.03.161.

- [39] P. M. Bösch, „Autonomous Vehicles - The next Revolution in Mobility“. Dissertation, ETH Zürich, 2018.
- [40] J. H. Gawron, G. A. Keoleian, R. D. de Kleine, T. J. Wallington und H. C. Kim, „Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects“, *Environmental Science & Technology*, Jg. 52, Nr. 5, S. 3249–3256, 2018.
- [41] F. Fehn, R. Engelhardt, F. Dandl, K. Bogenberger und F. Busch, „Integrating Parcel Deliveries into a Ride-Pooling Service -- An Agent-Based Simulation Study“, 2022.
- [42] B. A. Beirigo, F. Schulte und R. R. Negenborn, „Integrating People and Freight Transportation Using Shared Autonomous Vehicles with Compartments“, *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 51, Nr. 9, S. 392–397, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.07.064.
- [43] S. Li, E. Garces und T. Daim, „Technology forecasting by analogy-based on social network analysis: The case of autonomous vehicles“, *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 148, S. 119731, 2019, doi: 10.1016/j.techfore.2019.119731.
- [44] Y. Li, Y. Zhou, X. Ma und Y. Zhang, „Forecasting the Development of Self-Driving Technology in China by Multidimensional Information“, *Journal of Advanced Transportation*, Jg. 2021, S. 1–12, 2021, doi: 10.1155/2021/1693459.
- [45] L. Gao *et al.*, „Technology life cycle analysis method based on patent documents“, *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 80, Nr. 3, S. 398–407, 2013, doi: 10.1016/j.techfore.2012.10.003.
- [46] D. Milakis, M. Snelder, B. van Arem, B. van Wee und Homem de Almeida Correia, Gonçalo, „Development and transport implications of automated vehicles in the Netherlands: scenarios for 2030 and 2050“, 17(1), S. 63–85, 2017, doi: 10.18757/EJTIR.2017.17.1.3180.
- [47] J. Guo, J. Pan, J. Guo, F. Gu und J. Kuusisto, „Measurement framework for assessing disruptive innovations“, *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 139, S. 250–265, 2019, doi: 10.1016/j.techfore.2018.10.015.
- [48] S. D. Anthony, M. W. Johnson, J. V. Sinfield und E. J. Altman, *The innovator's guide to growth: putting disruptive innovation to work*. Boston, Mass: Harvard Business Press, 2008.
- [49] V. Govindarajan und P. K. Kopalle, „Disruptiveness of innovations: measurement and an assessment of reliability and validity“, *Strategic Management Journal*, Jg. 27, Nr. 2, S. 189–199, 2006, doi: 10.1002/smj.511.
- [50] Vereinte Nationen, „The future we want: Outcome document of the United Nations Conference on Sustainable Development“ A/RES/66/288, 2012.
- [51] B. Herrenkind *et al.*, „Wie autonome Flugtaxis den Geschäftsmodellkontext von morgen beeinflussen könnten“ in *Neue Dimensionen der Mobilität*, H. Proff,

- Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, S. 11–26, doi: 10.1007/978-3-658-29746-6_3.
- [52] Mercedes-Benz, *eSprinter | Elektro Transporter*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mercedes-benz.de/vans/de/sprinter/e-sprinter-panel-van> (Zugriff am: 25. Oktober 2022).
- [53] Mercedes-Benz Group, *Erste international gültige Systemgenehmigung für hochautomatisiertes Fahren*, 2021.
- [54] Einride, *Remote operation: Human-led autonomy*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.einride.tech/autonomous/remote-operation> (Zugriff am: 4. November 2022).
- [55] Waymo, *Waymo One*. [Online]. Verfügbar unter: <https://waymo.com/waymo-one/> (Zugriff am: 4. November 2022).
- [56] MOOVE, *PEOPLE MOVER L4*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.moove.biz/de/people-mover-l4-the-moove/> (Zugriff am: 25. Oktober 2022).
- [57] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., *NGC Urban Modular Vehicle*. [Online]. Verfügbar unter: <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/ngc-umv> (Zugriff am: 25. Oktober 2022).
- [58] Rail Cargo Group, *Rollende Landstraße*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.railcargo.com/de/leistungen/rollende-landstrasse> (Zugriff am: 4. November 2022).
- [59] Flexiwaggon, *About Flexiwaggon*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.flexiwaggon.se/about-flexiwaggon/> (Zugriff am: 4. November 2022).
- [60] RailRunner North America, *Terminal Anywhere™ Solution*. [Online]. Verfügbar unter: <https://railrunner.com/terminal-anywhere-solution/> (Zugriff am: 4. November 2022).
- [61] Parallel Systems, *Product – Parallel*. [Online]. Verfügbar unter: <https://moveparallel.com/product/> (Zugriff am: 25. Oktober 2022).
- [62] W. Klebsch, P. Heiningen und J. Martin, „Alternativen zu Dieseltriebzügen im SPNV“, Frankfurt am Main, 2019.
- [63] AKKA, *Link & Fly*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.akka-technologies.com/case-study/link-fly-lufttransport-der-zukunft/?lang=de> (Zugriff am: 4. November 2022).
- [64] Yara International, *Yara Birkeland*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.yara.com/news-and-media/media-library/press-kits/yara-birkeland-press-kit/> (Zugriff am: 4. November 2022).
- [65] OTTOBAHN, *Technik*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ottobahn.de/technik/> (Zugriff am: 4. November 2022).

- [66] Volocopter GmbH, *Solutions*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.volocopter.com/solutions/> (Zugriff am: 25. Oktober 2022).
- [67] C. Kühnhold, „Smart City Loop“ in *Smart City – Made in Germany*, C. Etezzadeh, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020, S. 587–592, doi: 10.1007/978-3-658-27232-6_61.
- [68] The Boring Company, *Products*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.boring-company.com/products> (Zugriff am: 4. November 2022).
- [69] TUM Hyperloop, *About Hyperloop*. [Online]. Verfügbar unter: <https://tumhyperloop.com/about-hyperloop/> (Zugriff am: 4. November 2022).
- [70] Klein Vision, *Concept: AirCar*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.klein-vision.com/concept-2> (Zugriff am: 4. November 2022).
- [71] RWTH Aachen, *upBUS*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.upbus.rwth-aachen.de/> (Zugriff am: 2. September 2021).
- [72] Leitner AG, *ConnX*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.leitner.com/produkte/seilbahnsysteme/connx/> (Zugriff am: 23. September 2023).
- [73] H. D. Futschik *et al.*, „Formen und neue Konzepte“ in *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, H.-H. Braess und U. Seiffert, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, S. 119–219, doi: 10.1007/978-3-658-01691-3_4.
- [74] R. A. Schneider, „Baukastenstrategien im Automobilbereich“. Dissertation, Universität Kassel, Kassel, 2018.
- [75] I. Busche, „Ein Beitrag zur optimierten Konzeptauslegung von Fahrzeugen im Bereich der Elektromobilität“. Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Magdeburg, 2014.
- [76] I. Renner, „Methodische Unterstützung funktionsorientierter Baukastenentwicklung am Beispiel Automobil“, Technische Universität München (TUM), München, 2007.
- [77] C.-A. Hoffmann, „Methodik zur Steuerung modularer Produktbaukästen“. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2017.
- [78] H. Lemke, „MQB: Die Modul-Baukasten-Strategie des Volkswagen-Konzerns im Zusammenspiel mit globalen Systemlieferanten“, 2013.
- [79] M. Münster *et al.*, „U-Shift II Vision and Project Goals“ in *Springer eBook Collection, 22. Internationales Stuttgarter Symposium: Automobil- und Motorentechnik*, M. Bargende, H.-C. Reuss und A. Wagner, Hg., 1 Aufl., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint Springer Vieweg, 2022, S. 18–31, doi: 10.1007/978-3-658-37011-4_3.
- [80] KBA, „Verzeichnis zur Systematisierung von Kraftfahrzeugen und ihren Anhängern“, 2018.

- [81] A. Schulz, *Grundlagen Verkehr im Tourismus: Fluggesellschaften, Kreuzfahrten, Bahnen, Busse und Mietwagen*. München: Oldenbourg, 2010.
- [82] R. Hahn, „Fahrzeugkonzeptbilder von Robert Hahn (Mitarbeiter des DLR). Bilder des DLR unterstehen der Creative-Commons-Lizenz CC BY-NC-ND 3.0“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Stuttgart, 28. Okt. 2022.
- [83] S. Díaz *et al.*, „European vehicle market statistics 2021/2022“, The International Council on Clean Transportation (ICCT), 2021.
- [84] Statista; Dataforce, „Anzahl der Neuzulassungen von leichten Nutzfahrzeugen* nach Modellen in der EU im Jahr 2021: (und Vergleich zum Vorjahreszeitraum)“, 2022.
- [85] O. Schulze, *Elektromobilität – ein Ratgeber für Entscheider, Errichter, Betreiber und Nutzer: Facetten zu Ladeinfrastruktur, Subventionsregeln, Kosten und Handling*. Wiesbaden: Springer, 2022.
- [86] National Highway Traffic Safety Administration, *2022 Mercedes-Benz Sprinter 1500 Passenger Van*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nhtsa.gov/vehicle/2022/MERCEDES-BENZ/SPRINTER%2525201500%252520PASSENGER%252520VAN/VAN/RWD> (Zugriff am: 5. Dezember 2022).
- [87] T. Nguyen *et al.*, „Platooning of Autonomous Public Transport Vehicles: The Influence of Ride Comfort on Travel Delay“, *Sustainability*, Jg. 11, Nr. 19, S. 5237, 2019, doi: 10.3390/su11195237.
- [88] Lohr, *Cristal*. [Online]. Verfügbar unter: <https://lohr.fr/de/new-mobilities/> (Zugriff am: 2. September 2021).
- [89] Ducktrain, *Auto Duck*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ducktrain.io/auto-duck/> (Zugriff am: 5. November 2022).
- [90] NextFutureTransport, *Home*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.next-future-mobility.com/> (Zugriff am: 2. September 2021).
- [91] NAVYA, *Self-Driving Shuttle for Passenger Transportation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://navya.tech/en/solutions/moving-people/self-driving-shuttle-for-passenger-transportation/> (Zugriff am: 25. Oktober 2022).
- [92] MOOVE, *CARGO MOVER 11 L4*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.moove.biz/de/cargo-mover-11-l4-the-moove/> (Zugriff am: 25. Oktober 2022).
- [93] Rinspeed, *CitySnap*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.rinspeed.com/de/CitySnap_54_concept-car.html (Zugriff am: 1. September 2021).

- [94] Rinspeed, *MetroSnap*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.rinspeed.com/de/MetroSnap_51_concept-car.html (Zugriff am: 1. September 2021).
- [95] Konecranes, *Automatisierter Containertransport für leistungsorientierte Terminals*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.konecranes.com/de-at/krane-und-hebezeuge/containerumschlag/automatisierte-containertransportfahrzeuge/agv> (Zugriff am: 22. November 2022).
- [96] Rinspeed AG, *Snap*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.rinspeed.com/de/Snap_48_concept-car.html (Zugriff am: 25. Oktober 2022).
- [97] Heimann Fahrzeugbau, *Hubi 55*. [Online]. Verfügbar unter: <https://heimann-fahrzeugbau.de/de/hubi-55> (Zugriff am: 1. September 2021).
- [98] Liftcontainer, *Die Absenkbare Wechselbrücke*. [Online]. Verfügbar unter: <https://liftcontainer.de/> (Zugriff am: 1. September 2021).
- [99] RYTLE, *Home*. [Online]. Verfügbar unter: <https://rytle.de/> (Zugriff am: 5. November 2022).
- [100] Kalmar, *AutoStrad*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kalmar.de/equipment-services/portalthubwagen/autostrad/> (Zugriff am: 22. November 2022).
- [101] A. Kampker, D. Vallée und A. Schnettler, Hg., *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie*, 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [102] D. Vallée, B. Engel und W. Vogt, *Stadtverkehrsplanung Band 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021.
- [103] F.-J. van Audenhove *et al.*, „The Future of Mobility 3.0“, Arthur D. Little; UITP, 2018.
- [104] K. Aljohani und R. G. Thompson, „An Examination of Last Mile Delivery Practices of Freight Carriers Servicing Business Receivers in Inner-City Areas“, *Sustainability*, Jg. 12, Nr. 7, S. 2837, 2020, doi: 10.3390/su12072837.
- [105] Allekotte, Michel, K. Biemann, C. Heidt, M. Colson und W. Knörr, „Aktualisierung der Modelle TREMOD/TREMOD-MM für die Emissionsberichterstattung 2020 (Berichtsperiode 1990-2018)“, ifeu-Institut, Dessau-Roßlau, Texte | 116/2020 123 135, 2020.
- [106] Heinrich-Böll-Stiftung; VCD Verkehrsclub Deutschland e.V., *Mobilitätsatlas 2019: Daten und Fakten für die Verkehrswende*, 1. Aufl. Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung, 2019.
- [107] PTV Planung Transport Verkehr AG, PTV Transport Consult GmbH, Karlsruher Institut für Technologie und Rödl & Partner GbR, „LEA(Klein-)Bus“, Berlin/Karlsruhe/Hamburg, 2019.

- [108] Bundesvereinigung Logistik und HERE Technologies, „Accelerating Urban Logistics: Eine gemeinsame Studie von BVL.digital und HERE Technologies“.
- [109] B. Leerkamp, „Stadtlogistik reloaded: Alte und neue Handlungsansätze im städtischen Wirtschaftsverkehr“, 2018.
- [110] H. J. Quak, *Sustainability of urban freight transport retail distribution and local regulations in cities*. Rotterdam: ERIM, 2008.
- [111] H. Flämig, *Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung: Wirtschaftsverkehr*, 2018. Aufl. Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung, 2018.
- [112] M. Hesse, *Massnahmen zur umweltschonenden Abwicklung des städtischen Wirtschaftsverkehrs*, 1996.
- [113] Y. Liao, J. Gil, R. H. M. Pereira, S. Yeh und V. Verendel, „Disparities in travel times between car and transit: Spatiotemporal patterns in cities“, *Scientific Reports*, Jg. 10, Nr. 1, S. 4056, 2020, doi: 10.1038/s41598-020-61077-0.
- [114] M. Friedrich und M. Hartl, „MEGAFON“, Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen, Stuttgart, 2016.
- [115] K.-H. Storchmann, *Das Defizit im öffentlichen Personennahverkehr in Theorie und Empirie*. Duncker & Humblot, 1999.
- [116] Landeshauptstadt Stuttgart, *Öffentlicher Nahverkehr – unterwegs mit Bus und Bahn*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stuttgart.de/leben/mobilitaet/oepnv/> (Zugriff am: 19. August 2022).
- [117] J. Gies und V. Langer, „Mit On-Demand-Angeboten ÖPNV-Bedarfsverkehre modernisieren: Werkstattbericht zu Chancen und Herausforderungen“, 2021.
- [118] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, *Hinweise für Kenngrößen zur Beschreibung und Bewertung von Ridepooling-Systemen: H KRipoo*, 2021. Aufl. Köln: FGSV, 2021.
- [119] Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, Hg., „ÖPNV Report Baden-Württemberg 2020: Ergebnisbericht“. Addendum zu Erreichbarkeit und Bedienungsqualität, Civity Management Consultants, Berlin/Hamburg, 2020.
- [120] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), „VDV-Statistik 2020“, 2021.
- [121] BMVI, „Mobilität in Deutschland 2017: Tabellarische Grundauswertung“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2018.
- [122] R. Gerike, S. Hubrich, F. Ließke, S. Wittig und R. Wittwer, „Sonderauswertung zum Forschungsprojekt „Mobilität in Städten – SrV 2018“: Städtevergleich“, TU Dresden, Dresden, 2021.
- [123] BMVI, „Mobilität in Deutschland 2008“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2010.

- [124] BMVI, „Mobilität in Deutschland 2002“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2003.
- [125] C. Mehlert und M. Schiefelbusch, „Mobility on-demand: Disruption oder Hype?: Entwicklung und Zukunft von Rufbus, Sharing und Robotaxi“, *Der Nahverkehr*, Jg. 35, 7/8, S. 6–12, 2017.
- [126] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV), „Ridepooling als Teil des ÖPNV“ VDV-Mitteilung 9067, 2019.
- [127] Projektteam Hub Chain, Hg., „Leitfaden für den Betrieb von On-Demand-Bussen im suburbanen und ländlichen Raum“, 2021.
- [128] J. Brake, J. D. Nelson und S. Wright, „Demand responsive transport: towards the emergence of a new market segment“, *Journal of Transport Geography*, Jg. 12, Nr. 4, S. 323–337, 2004, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2004.08.011.
- [129] D. Lohre, R. Pfennig, V. Poerschke und R. Gotthardt, *Nachhaltigkeitsmanagement für Logistikdienstleister: Ein Praxisleitfaden*, 2015.
- [130] M. Y. Ma, „City Logistics in China – An Empirical Study from An Emerging-Market- Economy Country“, 2014.
- [131] Bundesverband Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK) und KE-CONSULT Kurte&Esser GbR, „KEP-Studie 2021 – Analyse des Marktes in Deutschland“, Berlin, 2021.
- [132] C. Zanker, *Branchenanalyse Logistik: Der Logistiksektor zwischen Globalisierung, Industrie 4.0 und Online-Handel*. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung, 2018.
- [133] R. Bogdanski und C. Cailliau, „KEP und ÖPNV: Chance für die letzte Meile?“, 2022.
- [134] Bundesverband Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK) und KE-CONSULT Kurte&Esser GbR, „BIEK Kompendium Teil 6: Marktanteile der Zustellkonzepte im B2C-Segment“, 2018.
- [135] H. Jordan *et al.*, „Die Veränderungen des gewerblichen Lieferverkehrs und dessen Auswirkungen auf die städtische Logistik: Ergebnisbericht“, LNC LogisticNetwork Consultants GmbH; Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, 2020.
- [136] Bundesverband Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK) und KE-CONSULT Kurte&Esser GbR, „BIEK Kompendium Teil 2: Fahrzeugbestand und Fahrleistungen“, 2018.
- [137] M. Schwemmer, K. Dürrbeck und P. Klaus, *TOP 100 der Logistik 2020/2021: Auszug der Studie*. Hamburg: DVV Media Group, 2020.
- [138] T. Mühlencoert, *Kontraktlogistik-Management: Grundlagen - Beispiele - Checklisten*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2012.

- [139] F. Bruzzone, F. Cavallaro und S. Nocera, „The integration of passenger and freight transport for first-last mile operations“, *Transport Policy*, Jg. 100, S. 31–48, 2021.
- [140] P. Wittenbrink, B. Leerkamp und T. Holthaus, „Städtisches Güterverkehrskonzept Basel: Schlussbericht“, Luzern, Schweiz, 2016.
- [141] L. Weber, „Von der Idee bis zum dauerhaften Betrieb“. Jena, Deutschland, 11. Mai 2022.
- [142] M. Drewitz, *Transportlogistik mittels Güterstraßenbahn*. AV AKADEMIKERVERLAG, 2012.
- [143] W.-H. Arndt, „Urban freight transport as part of transportation planning“, 2020.
- [144] C. Vollrath, „Waren mit der Tram on tour“. Jena, Deutschland, 2022.
- [145] TU Hamburg, *TaBuLa-LOG: TaBuLa Shuttle - elektrischer, automatisiert verkehrender Bus in Lauenburg*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tabulashuttle.de/tabula-log/> (Zugriff am: 9. Juni 2022).
- [146] kombiBUS Gruppe und Interlink GmbH, *kombiBUS*. [Online]. Verfügbar unter: <http://kombibus.de/> (Zugriff am: 9. Juni 2022).
- [147] Europäische Kommission, *MULL: Buslorry with multiple use goods and passenger transport*. [Online]. Verfügbar unter: <https://cordis.europa.eu/project/id/TR-00052-95> (Zugriff am: 9. Juni 2022).
- [148] Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, „MultiBus: Das Nahbus-system für den ländlichen Raum“. Schlussbericht, 2005.
- [149] Northern Periphery Programme und European Union, *RTS: Rural Transport Solutions 4.5*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.northern-periphery.eu/en/projects/show/&tid=70> (Zugriff am: 9. Juni 2022).
- [150] J. Zimmermann, M. Kuchenbecker und H. Manner-Romberg, „Logistik auf der letzten Meile: Reallabor Stadt“, Drees & Sommer SE; LNC LogisticNetwork Consultants GmbH; MRU GmbH, 2021.
- [151] TomTom International BV, *Traffic congestion ranking: TomTom Traffic Index*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/ranking/ (Zugriff am: 14. Juni 2022).
- [152] F. Zwicky, *Entdecken - Erfinden - Forschen im morphologischen Weltbild*. München, Zürich: Droemer Knauer, 1971.
- [153] C. Thaller, „Rückkopplung einer Makroskopischen Extrapolation mit einer Mikroskopischen Verkehrssimulation“. Dissertation, TU Dortmund, 2018.
- [154] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., *TAPAS: Modell für die zukünftige Nachfrage des Personenverkehrs im urbanen Raum*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dlr.de/vf/desktopdefault.aspx/tabid-12751/22270_read-29381 (Zugriff am: 20. August 2022).

- [155] BMVI, „Mobilität in Deutschland 2017: Ergebnisbericht“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2018.
- [156] BMVI, „Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD 2010): Schlussbericht“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2012.
- [157] Berlin, *Verkehrsmodell*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.berlin.de/sen/uvk/verkehr/verkehrsdaten/verkehrsmodell/> (Zugriff am: 28. Februar 2023).
- [158] M. Gessert, „Gesamtstädtisches Verkehrsmodell: Für Hamburg und das Umland“. Hamburg, 26. Feb. 2020.
- [159] Verband Region Stuttgart (VRS), „Mobilität und Verkehr in der Region Stuttgart 2009/2010“, Stuttgart, 2011.
- [160] T. Schlenther, P. Wagner, G. Rybczak, K. Nagel, L. Bieker-Walz und M. Ortgiese, „Simulation-based investigation of transport scenarios for Hamburg“, *Procedia Computer Science*, Jg. 201, S. 587–593, 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.03.076.
- [161] S. Borgato, F. Fermi, F. Chirico und S. Bosetti, „Study on costs and benefits of the sustainable urban mobility transition: D3: Final Report (long version)“. EIT Urban Mobility, TRT Trasporti e Territorio, Mailand, Italien, 2021.
- [162] L. M. Martinez und J. M. Viegas, „Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system: An agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal“, *International Journal of Transportation Science and Technology*, Jg. 6, Nr. 1, S. 13–27, 2017, doi: 10.1016/j.ijst.2017.05.005.
- [163] *OpenStreetMap: About*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.openstreetmap.org/about> (Zugriff am: 10. August 2022).
- [164] A. A. Hagberg, D. A. Schult und P. J. Swart, „Exploring Network Structure, Dynamics, and Function using NetworkX“ in *Proceedings of the 7th Python in Science Conference*, 2008, S. 11–15.
- [165] *Map features – OpenStreetMap Wiki*. [Online]. Verfügbar unter: https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Map_features (Zugriff am: 10. August 2022).
- [166] U. Müller-Steinfahrt *et al.*, „Green-City Plan Würzburg: Abschlussbericht“, Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, 2018.
- [167] M. Gabler, S. Schröder, H. Friedrich und G. Liedtke, „Generierung der Nachfragestrukturen für die mikroskopische Simulation des städtischen Distributionsverkehrs im Lebensmittelhandel“ in *Wirtschaftsverkehr 2013: Datenerfassung und verkehrsträgerübergreifende Modellierung des Güterverkehrs als Entscheidungsgrundlage für die Verkehrspolitik*, U. Clausen und C. Thaller, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 32–48.

- [168] Bundesverband Paket und Expresslogistik e. V. (BIEK) und KE-CONSULT Kurte&Esser GbR, „KEP-Studie 2022 - Analyse des Marktes in Deutschland“, Berlin, 2022.
- [169] D. Ronen, „Dispatching Petroleum Products“, *Operations Research*, Jg. 43, Nr. 3, S. 379–387, 1995, doi: 10.1287/opre.43.3.379.
- [170] J. Stolk, I. Mann, A. Mohais und Z. Michalewicz, „Combining vehicle routing and packing for optimal delivery schedules of water tanks“, *OR Insight*, Jg. 26, Nr. 3, S. 167–190, 2013, doi: 10.1057/ori.2013.1.
- [171] H.-W. Graf, „Optimierung des Wechselbrückentransports – ein Spezialfall der Tourenplanung“ in *Große Netze der Logistik*, P. Buchholz und U. Clausen, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 101–127, doi: 10.1007/978-3-540-71048-6_5.
- [172] Y. Liu, „Optimization of Dynamic Vehicle Routing Problem“. Dissertation, École centrale de Lille, Lille, Frankreich, 2017.
- [173] M. Keskin und B. Çatay, „Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Jg. 65, S. 111–127, 2016, doi: 10.1016/j.trc.2016.01.013.
- [174] I. Torres, C. Cruz und J. L. Verdegay, „Solving the Truck and Trailer Routing Problem with Fuzzy Constraints“, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, Jg. 8, Nr. 4, S. 713–724, 2015, doi: 10.1080/18756891.2015.1046330.
- [175] H. Li, T. Lv und Y. Lu, „The Combination Truck Routing Problem: A Survey“, *Procedia Engineering*, Jg. 137, S. 639–648, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.301.
- [176] S. Huber, J.-F. Cordeau und M. J. Geiger, „A heuristic for the swap body vehicle routing problem“, *OR Spectrum*, Jg. 42, Nr. 1, S. 111–160, 2020, doi: 10.1007/s00291-019-00570-z.
- [177] R. R. S. van Lon und T. Holvoet, „When do agents outperform centralized algorithms?“, *Auton Agent Multi-Agent Syst*, Jg. 31, Nr. 6, S. 1578–1609, 2017, doi: 10.1007/s10458-017-9371-y.
- [178] R. R. S. van Lon und T. Holvoet, „RinSim: A Simulator for Collective Adaptive Systems in Transportation and Logistics“ in *2012 IEEE 6th International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO 2012)*, Lyon, France, 2012, S. 231–232, doi: 10.1109/SASO.2012.41.
- [179] C. F. Daganzo und G. F. Newell, „Physical distribution from a warehouse: Vehicle coverage and inventory levels“, *Transportation Research Part B: Methodological*, Jg. 19, Nr. 5, S. 397–407, 1985, doi: 10.1016/0191-2615(85)90053-0.
- [180] E. Deineko, G. Knitschky und D. Rischke, „Exploratory Analysis of Transportation System for Modular Vehicle Concept Operated as Passenger and Goods Transport Using Continuum Approximation Techniques“ in *Lecture Notes in*

- Logistics, Advances in Resilient and Sustainable Transport*, U. Clausen und M. Dellbrügge, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2023, S. 223–240, doi: 10.1007/978-3-031-28236-2_14.
- [181] Y. Liu, Q. Ye, J. Escibano-Macias, Y. Feng und P. Angeloudis, „Location-Routing Planning for Last-Mile Deliveries Using Mobile Parcel Lockers: A Hybrid Q-Learning Network Approach“, 9. Sep. 2022.
- [182] Y. Wang, M. Bi und Y. Chen, „A Scheduling Strategy of Mobile Parcel Lockers for the Last Mile Delivery Problem“, *PROMET*, Jg. 32, Nr. 6, S. 875–885, 2020, doi: 10.7307/ptt.v32i6.3531.
- [183] C. Grisar und M. Meyer, „Use of Monte Carlo simulation: an empirical study of German, Austrian and Swiss controlling departments“, *J Manag Control*, Jg. 26, 2-3, S. 249–273, 2015, doi: 10.1007/s00187-015-0213-2.
- [184] H.-H. Bleuel, „Monte-Carlo-Analysen im Risikomanagement“, *Controlling*, Jg. 18, Nr. 7, S. 371–378, 2006, doi: 10.15358/0935-0381-2006-7-371.
- [185] VDI, *VDI 3780: Technikbewertung Begriffe und Grundlagen*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure, 2000.
- [186] G. Schuh und S. Klappert, *Technologiemanagement: Handbuch Produktion und Management 2*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [187] G. Drews und N. Hillebrand, *Lexikon der Projektmanagement-Methoden*, 1. Aufl. Freiburg, Berlin, München: Haufe Mediengruppe, 2007.
- [188] J. Feldhusen und K.-H. Grote, *Pahl/Beitz Konstruktionslehre*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [189] R. W. Saaty, „The analytic hierarchy process—what it is and how it is used“, *Mathematical Modelling*, Jg. 9, 3-5, S. 161–176, 1987.
- [190] T. L. Saaty, „Decision making with the analytic hierarchy process“, *IJSSCI*, Jg. 1, Nr. 1, S. 83, 2008, Art. no. 17590.
- [191] M. Münster, M. Schäffer, G. Kopp, G. Kopp und H. E. Friedrich, „New Approach for a Comprehensive Method for Urban Vehicle Concepts with Electric Powertrain and their Necessary Vehicle Structures“, *Transportation Research Procedia*, Jg. 14, S. 3686–3695, 2016, doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.487.
- [192] M. Felden, P. Butterling, P. Jeck, L. Eckstein und K. Hameyer, „Electric vehicle drive trains: From the specification sheet to the drive-train concept“ in *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010*, 2010, S. 5606531, doi: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606531.
- [193] N. H. Zardari, K. Ahmed, S. M. Shirazi und Z. B. Yusop, *Weighting Methods and their Effects on Multi-Criteria Decision Making Model Outcomes in Water Resources Management*. Cham: Springer International Publishing, 2015.

- [194] G. O. Odu, „Weighting methods for multi-criteria decision making technique“, *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, Jg. 23, Nr. 8, S. 1449, 2019, doi: 10.4314/jasem.v23i8.7.
- [195] R. Likert, „A technique for the measurement of attitudes“, *Archives of Psychology*, Jg. 22, Nr. 140, S. 5–55, 1932.
- [196] *Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren - Technisch-wirtschaftliche Bewertung*, VDI 2225 Blatt 3, VDI-Hauptgruppe Der Ingenieur in Beruf und Gesellschaft, Berlin, 1998.
- [197] W. Möhring und D. Schlütz, *Die Befragung in der Medien- und Kommunikationswissenschaft: Eine praxisorientierte Einführung*, 2. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2010.
- [198] R. Porst, *Fragebogen*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2011.
- [199] D. Westphal, „Adaptive Verkürzung des Analytischen Hierarchie Prozesses zur rationalen Lösung multikriterieller Entscheidungsprobleme“. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2016.
- [200] T. L. Saaty, „A scaling method for priorities in hierarchical structures“, *Journal of Mathematical Psychology*, Jg. 15, Nr. 3, S. 234–281, 1977, doi: 10.1016/0022-2496(77)90033-5.
- [201] E. H. Forman und S. I. Gass, „The Analytic Hierarchy Process—An Exposition“, *Operations Research*, Jg. 49, Nr. 4, S. 469–486, 2001, doi: 10.1287/opre.49.4.469.11231.
- [202] T. L. Saaty, *The analytic hierarchy process : planning, priority setting, resource allocation*. New York, London: McGraw-Hill International Book Co, 1980.
- [203] H. Lütters, *Online-Marktforschung*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 2004.
- [204] G. Haedrich, A. Kuß und E. Kreilkamp, „Der Analytic Hierarchy Process e. neues Hilfsmittel zur Analyse u. Entwicklung von Unternehmens- u. Marketingstrategien“, *Wirtschaftswissenschaftliches Studium*, Jg. 15, Nr. 3, S. 120, 1986.
- [205] G. Coyle, „The Analytical Hierarchy Process (AHP)“, Pearson Education Limited, 2004.
- [206] C. R. Harris *et al.*, „Array programming with NumPy“, *Nature*, Jg. 585, Nr. 7825, S. 357–362, 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2649-2.
- [207] W. McKinney, „Data Structures for Statistical Computing in Python: Pandas“ in *Python in Science Conference*, Austin, Texas, 2010, S. 56–61, doi: 10.25080/Majora-92bf1922-00a.
- [208] M. Burling, J. Gnam, J. Lundgren und E. Zayer, „How Europe’s Truck Makers Can Break Out of the Pack“, Bain & Company, 2018.

- [209] *Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten*, DIN EN 60300-3-3, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2004.
- [210] S. Toniolo, R. C. Tosato, F. Gambaro und J. Ren, „Life cycle thinking tools: Life cycle assessment, life cycle costing and social life cycle assessment“ in *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making*, Elsevier, 2020, S. 39–56, doi: 10.1016/B978-0-12-818355-7.00003-8.
- [211] P. Mock, „Entwicklung eines Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktanteile und CO₂-Emissionen von Kraftfahrzeugen (VECTOR21)“. Dissertation, Universität Stuttgart, 2010.
- [212] K. Geissdörfer, R. Gleich und A. Wald, „Standardisierungspotentiale lebenszyklusbasierter Modelle des strategischen Kostenmanagements“, *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, Jg. 79, Nr. 6, S. 693–715, 2009, doi: 10.1007/s11573-009-0256-7.
- [213] P. Plötz, T. Gnann, A. Kühn und Wietschel Martin, „Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge“, Fraunhofer ISI, 2013.
- [214] M. Wietschel, S. Timmerberg und N. Ashley-Belbin, „Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw“, Fraunhofer ISI, 2019.
- [215] P. Lebeau, C. Macharis und J. Van Mierlo, „How to Improve the Total Cost of Ownership of Electric Vehicles: An Analysis of the Light Commercial Vehicle Segment“, *WEVJ*, Jg. 10, Nr. 4, S. 90, 2019, doi: 10.3390/wevj10040090.
- [216] M. Wietschel *et al.*, „Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2017.
- [217] M. Redelbach, „Entwicklung eines dynamischen nutzenbasierten Szenariomodells zur Simulation der zukünftigen Marktentwicklung für alternative PKW-Antriebskonzepte“, Universität Stuttgart, 2014.
- [218] PwC, „Autonomes Fahren könnte Logistik-Kosten halbieren: Studie von PwC, zitiert nach Handelsblatt“, *Handelsblatt*, 13. Sep. 2018, 2018.
- [219] H. Schäfer, *Unternehmensinvestitionen: Grundzüge in Theorie und Management*. Heidelberg: Physica-Verlag Heidelberg, 2005.
- [220] D. G. Luenberger, *Investment science*. New York: Oxford Univ. Press, 1998.
- [221] *Umsatzsteuergesetz: UStG*, 1979.
- [222] D. Kalinowska, H. Kuhfeld, U. Kunert und O. Rülcke, *Die Abgaben auf Kraftfahrzeuge in Europa im Jahr 2005*. Berlin: DIW Berlin, 2005.
- [223] A. Keser, „Der Europäische Automobilssektor: Besteuerung, Marktliberalisierung und Beitrag zur CO₂-Reduktion“. Dissertation, Universität Potsdam, 2013.

- [224] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, *Erhöhter Umweltbonus für E-Autos*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bafa.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/Energie/Elektromobilitaet/2020_erhoehter_umweltbonus.html (Zugriff am: 12. November 2020).
- [225] A. Rogozhin, M. Gallaher und W. McManus, „Automobile Industry Retail Price Equivalent and Indirect Cost Multipliers“, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington EPA-420-R-09-003, 2009.
- [226] F. Dünnebeil, C. Reinhard, U. Lambrecht, A. Kies, S. Hausberger und M. Rexeis, „Zukünftige Maßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und Treibhausgasreduzierung bei schweren Nutzfahrzeugen“, Umweltbundesamt (UBA), 2015.
- [227] A. Rogozhin, M. Gallaher, A. Lentz und W. McManus, „Heavy Duty Truck Retail Price Equivalent and Indirect Cost Multipliers“, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington EPA-420-D-10-100, 2010.
- [228] *Einkommensteuergesetz: EStG*, 2009.
- [229] *Handelsgesetzbuch: HGB*, 2020.
- [230] Bundesministerium der Finanzen, „Die wichtigsten Steuern im internationalen Vergleich 2015“, 2016.
- [231] *AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig Personen- und Güterbeförderung (im Straßen- und Schienenverkehr)*, 1998.
- [232] Destatis, *Detaillierte Zusammensetzung der Arbeitskosten im Produzierenden Gewerbe und Dienstleistungsbereich 2020*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Arbeit/Arbeitskosten-Lohnnebenkosten/Tabellen/struktur-kostenart.html> (Zugriff am: 29. Dezember 2022).
- [233] W. Weidner und R. Weidner, „Identifikation neuer Ansätze zur individuellen Kfz-Tarifierung“, *ZVersWiss*, Jg. 103, Nr. 2, S. 167–193, 2014, doi: 10.1007/s12297-014-0268-4.
- [234] M. Radtke, *Grundlagen der Kalkulation von Versicherungsprodukten in der Schaden- und Unfallversicherung*. Verlag Versicherungswirtschaft GmbH, 2008.
- [235] T. S. Stephens, J. Gonder, Y. Chen, Z. Lin, C. Liu und D. Gohlke, „Estimated Bounds and Important Factors for Fuel Use and Consumer Costs of Connected and Automated Vehicles“ NREL/TP-5400-67216, 1334242, 2016.
- [236] J. Albright, A. Bell, J. Schneider und C. Nice, „Marketplace Change“, KPMG, 2015.
- [237] A. Hars, „Flotten selbstfahrender Elektrotaxis – Eine Szenarioanalyse“ in *Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität*, H. Proff, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, S. 615–632, doi: 10.1007/978-3-658-09577-2_39.

- [238] Z. Wadud, „Fully automated vehicles: A cost of ownership analysis to inform early adoption“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Jg. 101, S. 163–176, 2017, doi: 10.1016/j.tra.2017.05.005.
- [239] Bundesministerium der Finanzen, *Kfz-Steuer-Rechner*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Service/Apps_Rechner/KfzRechner/KfzRechner.html (Zugriff am: 7. April 2021).
- [240] BMWi, „Integrierter Nationaler Energie- und Klimaplan“, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), 2020.
- [241] A. König, L. Nicoletti, D. Schröder, S. Wolff, A. Waclaw und M. Lienkamp, „An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles“, *WEVJ*, Jg. 12, Nr. 1, S. 21, 2021, doi: 10.3390/wevj12010021.
- [242] L. Yang, C. Hao und Y. Chai, „Life Cycle Assessment of Commercial Delivery Trucks: Diesel, Plug-In Electric, and Battery-Swap Electric“, *Sustainability*, Jg. 10, Nr. 12, S. 4547, 2018, doi: 10.3390/su10124547.
- [243] J. Schoch, „Battery Life Optimal Operation of Electric Vehicles“. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2018.
- [244] B. Cox, C. Bauer, A. Mendoza Beltran, D. P. van Vuuren und C. L. Mutel, „Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios“, *Applied Energy*, Jg. 269, S. 115021, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115021.
- [245] A. Temporelli, M. L. Carvalho und P. Girardi, „Life Cycle Assessment of Electric Vehicle Batteries: An Overview of Recent Literature“, *Energies*, Jg. 13, Nr. 11, S. 2864, 2020, doi: 10.3390/en13112864.
- [246] J. Ma *et al.*, „The 2021 battery technology roadmap“, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Jg. 54, Nr. 18, S. 183001, 2021, doi: 10.1088/1361-6463/abd353.
- [247] X.-G. Yang, T. Liu und C.-Y. Wang, „Thermally modulated lithium iron phosphate batteries for mass-market electric vehicles“, *Nat Energy*, Jg. 6, Nr. 2, S. 176–185, 2021, doi: 10.1038/s41560-020-00757-7.
- [248] A. Thielmann, C. Neef, T. Hettesheimer, H. Döscher, M. Wietschel und J. Tübke, „Energiespeicher-Roadmap (Update 2017) - Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien“, Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI, Karlsruhe, 2017.
- [249] T. R. Hawkins, B. Singh, G. Majeau-Bettez und A. H. Strømman, „Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles“, *Journal of Industrial Ecology*, Jg. 17, Nr. 1, S. 53–64, 2013, doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x.
- [250] D.-Y. Lee und V. M. Thomas, „Parametric modeling approach for economic and environmental life cycle assessment of medium-duty truck electrification“,

- Journal of Cleaner Production*, Jg. 142, S. 3300–3321, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.139.
- [251] I. Tsiropoulos, D. Tarvydas und N. Lebedeva, *Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications: Scenarios for costs and market growth*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018.
- [252] Advanced Propulsion Centre UK; Automotive Council UK, „Technology Roadmap Electrical Energy Storage“, 2020.
- [253] F. Kleiner und H. Friedrich, „Maintenance & Repair Cost Calculation and Assessment of Resale Value for Different Alternative Commercial Vehicle Powertrain Technologies“ in *EVS30 Symposium*, 2017.
- [254] B. Propfe, M. Redelbach, D. Santini und H. Friedrich, „Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values“, *WEVJ*, Jg. 5, Nr. 4, S. 886–895, 2012.
- [255] Deloitte, „Urbane Mobilität und autonomes Fahren im Jahr 2035“, 2019.
- [256] *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*, DIN EN ISO 14044, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2021.
- [257] M. Krail *et al.*, „Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr“, Fraunhofer ISI *et al.*, Karlsruhe, 2019.
- [258] J. Igl und F. Kellner, „Exploring greenhouse gas reduction opportunities for retailers in Fast Moving Consumer Goods distribution networks“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Jg. 50, S. 55–69, 2017, doi: 10.1016/j.trd.2016.10.008.
- [259] Z. Wadud, D. MacKenzie und P. Leiby, „Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles“, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Jg. 86, S. 1–18, 2016, doi: 10.1016/j.tra.2015.12.001.
- [260] A. Vahidi und A. Sciarretta, „Energy saving potentials of connected and automated vehicles“, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Jg. 95, S. 822–843, 2018, doi: 10.1016/j.trc.2018.09.001.
- [261] *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*, DIN EN ISO 14040, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2021.
- [262] R. Griebhammer und C. Hochfeld, „Memorandum Product Carbon Footprint“, Öko-Institut e.V., Berlin, 2009.
- [263] T. R. Hawkins, O. M. Gausen und A. H. Strømman, „Environmental impacts of hybrid and electric vehicles—a review“, *Int J Life Cycle Assess*, Jg. 17, Nr. 8, S. 997–1014, 2012, doi: 10.1007/s11367-012-0440-9.
- [264] L. C. Casals, B. A. García, F. Aguesse und A. Iturrondobeitia, „Second life of electric vehicle batteries: relation between materials degradation and

- environmental impact", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 22, Nr. 1, S. 82–93, 2017, doi: 10.1007/s11367-015-0918-3.
- [265] C. Tagliaferri *et al.*, „Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach“, *Chemical Engineering Research and Design*, Jg. 112, S. 298–309, 2016, doi: 10.1016/j.cherd.2016.07.003.
- [266] B. Cox, C. L. Mutel, C. Bauer, A. Mendoza Beltran und D. P. van Vuuren, „Uncertain Environmental Footprint of Current and Future Battery Electric Vehicles“, *Environmental Science & Technology*, Jg. 52, Nr. 8, S. 4989–4995, 2018, doi: 10.1021/acs.est.8b00261.
- [267] F. Paulino, A. Pina und P. Baptista, „Evaluation of Alternatives for the Passenger Road Transport Sector in Europe: A Life-Cycle Assessment Approach“, *Environments*, Jg. 5, Nr. 2, S. 21, 2018, doi: 10.3390/environments5020021.
- [268] Y. Zhao, N. C. Onat, M. Kucukvar und O. Tatari, „Carbon and energy footprints of electric delivery trucks: A hybrid multi-regional input-output life cycle assessment“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Jg. 47, S. 195–207, 2016, doi: 10.1016/j.trd.2016.05.014.
- [269] M. Brost *et al.*, „Energy Consumption of Connected and Automated Vehicles“ in *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, R. A. Meyers, Hg., New York, NY: Springer New York, 2020, S. 1–24, doi: 10.1007/978-1-4939-2493-6_1098-1.
- [270] J. B. Greenblatt und S. Shaheen, „Automated Vehicles, On-Demand Mobility, and Environmental Impacts“, *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, Jg. 2, Nr. 3, S. 74–81, 2015, doi: 10.1007/s40518-015-0038-5.
- [271] B. Sen, M. Kucukvar, N. C. Onat und O. Tatari, „Life cycle sustainability assessment of autonomous heavy-duty trucks“, *Journal of Industrial Ecology*, Jg. 24, Nr. 1, S. 149–164, 2020, doi: 10.1111/jiec.12964.
- [272] M. Neef, T. Dettmer und L. Schebek, „Comparing Carbon Performances of Mobility Services and Private Vehicles from a Life Cycle Perspective“ in *Progress in Life Cycle Assessment 2018*, Springer, 2018, S. 47–60.
- [273] M. Vilaça, G. Santos, M. S. Oliveira, M. C. Coelho und G. H. Correia, „Life cycle assessment of shared and private use of automated and electric vehicles on interurban mobility“, *Applied Energy*, Jg. 310, S. 118589, 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118589.
- [274] Buyle, Audenaert, Billen, Boonen und Van Passel, „The Future of Ex-Ante LCA? Lessons Learned and Practical Recommendations“, *Sustainability*, Jg. 11, Nr. 19, S. 5456, 2019, doi: 10.3390/su11195456.
- [275] R. Arvidsson *et al.*, „Environmental Assessment of Emerging Technologies: Recommendations for Prospective LCA“, *Journal of Industrial Ecology*, Jg. 22, Nr. 6, S. 1286–1294, 2018, doi: 10.1111/jiec.12690.

- [276] F. Field, R. Kirchain und J. Clark, „Life-Cycle Assessment and Temporal Distributions of Emissions: Developing a Fleet-Based Analysis“, *Journal of Industrial Ecology*, Jg. 4, Nr. 2, S. 71–91, 2000, doi: 10.1162/108819800569816.
- [277] C. Bauer, J. Buchgeister, R. Hischer, W. R. Poganietz, L. Schebek und J. Warsen, „Towards a framework for life cycle thinking in the assessment of nanotechnology“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 16, 8-9, S. 910–926, 2008, doi: 10.1016/j.jclepro.2007.04.022.
- [278] J. Matheys, W. van Autenboer, J.-M. Timmermans, J. Van Mierlo, P. van den Bossche und G. Maggetto, „Influence of functional unit on the life cycle assessment of traction batteries“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 12, Nr. 3, S. 191–196, 2007, doi: 10.1065/lca2007.04.322.
- [279] N. Hill *et al.*, *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA: Final report*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.
- [280] N. Schelte, S. Severengiz, J. Schünemann, S. Finke, O. Bauer und M. Metzen, „Life Cycle Assessment on Electric Moped Scooter Sharing“, *Sustainability*, Jg. 13, Nr. 15, S. 8297, 2021, doi: 10.3390/su13158297.
- [281] C. Thiel, A. Perujo und A. Mercier, „Cost and CO2 aspects of future vehicle options in Europe under new energy policy scenarios“, *Energy Policy*, Jg. 38, Nr. 11, S. 7142–7151, 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2010.07.034.
- [282] P. Suski und K. Wiesen, „Einsatz von Sekundärmaterial vs. recyclinggerechtes Design: Diskussion verschiedener End-of-Life-Allokationen unter Berücksichtigung der europäischen Abfallhierarchie“, *UmweltWirtschaftsForum*, Jg. 24, Nr. 1, S. 7–13, 2016, doi: 10.1007/s00550-016-0395-6.
- [283] D. A. Notter *et al.*, „Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles“, *Environmental Science & Technology*, Jg. 44, Nr. 17, S. 6550–6556, 2010, doi: 10.1021/es903729a.
- [284] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz und B. Weidema, „The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 21, Nr. 9, S. 1218–1230, 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1087-8.
- [285] *Umberto LCA+: Version 10.0, Build 10.0.3.182*, 2020.
- [286] A. Del Duce, M. Gauch und H.-J. Althaus, „Electric passenger car transport and passenger car life cycle inventories in ecoinvent version 3“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 21, Nr. 9, S. 1314–1326, 2016, doi: 10.1007/s11367-014-0792-4.
- [287] H. Martens und D. Goldmann, *Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.

- [288] K. Wötzel, „Ökobilanzierung der Altfahrzeugverwertung am Fallbeispiel eines Mittelklassefahrzeuges und Entwicklung einer Allokationsmethodik“. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 2007.
- [289] M. Schlesinger, D. Lindenberger und C. Lutz, „Entwicklung der Energiemärkte: Energiereferenzprognose“ Projekt Nr. 57/12, 2014.
- [290] SMARD und Bundesnetzagentur, *Strommarktdaten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.smard.de/home/> (Zugriff am: 24. November 2022).
- [291] Y. Wu und D. Su, „Review of Life Cycle Impact Assessment (LCIA) Methods and Inventory Databases“ in *Sustainable Product Development*, D. Su, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 39–55, doi: 10.1007/978-3-030-39149-2_3.
- [292] J. L. Osorio-Tejada, E. Llera-Sastresa und S. Scarpellini, „Environmental assessment of road freight transport services beyond the tank-to-wheels analysis based on LCA“, *Environ Dev Sustain*, 2022, doi: 10.1007/s10668-022-02715-7.
- [293] M. Goedkoop, R. Heijungs, M. Huijbregts, A. D. Schryver, J. Struijs und R. v. Zelm, „ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level“. Report I: Characterisation, 2009.
- [294] A. Keyvanfar, A. Shafaghat, N. Muhammad und M. Ferwati, „Driving Behaviour and Sustainable Mobility—Policies and Approaches Revisited“, *Sustainability*, Jg. 10, Nr. 4, S. 1152, 2018, doi: 10.3390/su10041152.
- [295] G. Calleja-Sanz, J. Olivella-Nadal und F. Solé-Parellada, „Technology Forecasting: Recent Trends and New Methods“ in *Management and Industrial Engineering, Research Methodology in Management and Industrial Engineering*, C. Machado und J. P. Davim, Hg., Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 45–69, doi: 10.1007/978-3-030-40896-1_3.
- [296] A. T. Roper, S. W. Cunningham, A. L. Porter, T. W. Mason, F. A. Rossini und J. Banks, *Forecasting and management of technology*, 2. Aufl. Hoboken N.J.: John Wiley & Sons, 2011.
- [297] S. Y. Park, J. W. Kim und D. H. Lee, „Development of a market penetration forecasting model for Hydrogen Fuel Cell Vehicles considering infrastructure and cost reduction effects“, *Energy Policy*, Jg. 39, Nr. 6, S. 3307–3315, 2011, doi: 10.1016/j.enpol.2011.03.021.
- [298] B. Propfe, D. Kreyenberg, J. Wind und S. Schmid, „Market penetration analysis of electric vehicles in the German passenger car market towards 2030“, *International Journal of Hydrogen Energy*, Jg. 38, Nr. 13, S. 5201–5208, 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.02.049.
- [299] S. Ehrenberger, S. Seum, T. Pregger, S. Simon, G. Knitschky und U. Kugler, „Land transport development in three integrated scenarios for Germany –

- Technology options, energy demand and emissions“, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Jg. 90, S. 102669, 2021, doi: 10.1016/j.trd.2020.102669.
- [300] M. Lavasani, X. Jin und Y. Du, „Market Penetration Model for Autonomous Vehicles on the Basis of Earlier Technology Adoption Experience“, *Transportation Research Record*, Jg. 2597, Nr. 1, S. 67–74, 2016, doi: 10.3141/2597-09.
- [301] K. Merfeld, M.-P. Wilhelms, S. Henkel und K. Kreutzer, „Carsharing with shared autonomous vehicles: Uncovering drivers, barriers and future developments – A four-stage Delphi study“, *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 144, S. 66–81, 2019, doi: 10.1016/j.techfore.2019.03.012.
- [302] B. Förster, „Technology foresight for sustainable production in the German automotive supplier industry“, *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 92, S. 237–248, 2015, doi: 10.1016/j.techfore.2014.09.010.
- [303] T. Abele, *Verfahren für das Technologie-Roadmapping zur Unterstützung des strategischen Technologiemanagements*. Heimsheim: Jost-Jetter, 2006.
- [304] A. K. Firat, W. L. Woon und S. Madnick, *Technological Forecasting – A Review*. Cambridge, MA, USA: Composite Information Systems Laboratory (CISL), Massachusetts Institute of Technology (MIT). Verfügbar unter: <http://web.mit.edu/smadnick/www/wp/2008-15.pdf>. Zugriff am: 28.3.22.
- [305] F. Michard und J. L. Teboul, „Predictive analytics: beyond the buzz“, *Annals of intensive care*, Jg. 9, Nr. 1, S. 46, 2019, doi: 10.1186/s13613-019-0524-9.
- [306] U. Ammon, „Delphi-Befragung“ in *Handbuch Methoden der Organisationsforschung*, S. Kühl, P. Strodtholz und A. Taffertshofer, Hg., Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009, S. 458–476, doi: 10.1007/978-3-531-91570-8_22.
- [307] NASA, „Technology Readiness Level Definitions“, 2010.
- [308] R. Williamson und J. Beasley, „Automotive Technology and Manufacturing Readiness Levels“, Automotive Council UK, 2011.
- [309] C. Ulrich, B. Frieske, S. A. Schmid und H. E. Friedrich, „Monitoring and Forecasting of Key Functions and Technologies for Automated Driving“, *Forecasting*, Jg. 4, Nr. 2, S. 477–502, 2022, doi: 10.3390/forecast4020027.
- [310] Duden, *Disruption*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.duden.de/recht-schreibung/Disruption> (Zugriff am: 30. Dezember 2021).
- [311] G. Meck und B. Weiguny, „Disruption, Baby, Disruption!“, *Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung*, 27. Dez. 2015, 2015.
- [312] C. M. Christensen, *The innovator’s dilemma: when new technologies cause great firms to fail*. Boston, Massachusetts: Harvard Business Review Press, 1997.

- [313] M. Dijk, P. Wells und R. Kemp, „Will the momentum of the electric car last? Testing an hypothesis on disruptive innovation“, *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 105, S. 77–88, 2016, doi: 10.1016/j.techfore.2016.01.013.
- [314] R. N. Foster, *Innovation: Die technologische Offensive*. Wiesbaden: Gabler, 1986.
- [315] C. Iyer und R. Alton, „The Race for Autonomous Ride Hailing“, Clayton Christensen Institute; Tata Consultancy Services, 2019.
- [316] T. Strathmann, *Elektromobilität als disruptive Innovation*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [317] C. M. Christensen, M. E. Raynor und R. McDonald, „What Is Disruptive Innovation?“, *Harvard Business Review*, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://hbr.org/2015/12/what-is-disruptive-innovation>
- [318] S. Hardman, R. Steinberger-Wilckens und D. van der Horst, „Disruptive innovations: The case for hydrogen fuel cells and battery electric vehicles“, *International Journal of Hydrogen Energy*, Jg. 38, Nr. 35, S. 15438–15451, 2013, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.09.088.
- [319] C. C. Hang, J. Chen und D. Yu, „An Assessment Framework for Disruptive Innovation“, *IEEE Eng. Manag. Rev.*, Jg. 41, Nr. 4, S. 109–118, 2013, doi: 10.1109/EMR.2013.2288146.
- [320] R. N. Kostoff, R. Boylan und G. R. Simons, „Disruptive technology roadmaps“, *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 71, 1-2, S. 141–159, 2004, doi: 10.1016/S0040-1625(03)00048-9.
- [321] J. Gans, *The disruption dilemma*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2016.
- [322] F. Hahn, S. Jensen und S. Tanev, „Disruptive Innovation vs Disruptive Technology: The Disruptive Potential of the Value Propositions of 3D Printing Technology Startups“, *Technology Innovation Management Review*, S. 10, 2014.
- [323] A. Keller und S. Hüsig, „Ex ante identification of disruptive innovations in the software industry applied to web applications: The case of Microsoft's vs. Google's office applications“, *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 76, Nr. 8, S. 1044–1054, 2009, doi: 10.1016/j.techfore.2009.03.005.
- [324] R. Adner, „When are technologies disruptive? a demand-based view of the emergence of competition“, *Strat. Mgmt. J.*, Jg. 23, Nr. 8, S. 667–688, 2002, doi: 10.1002/smj.246.
- [325] G. M. Schmidt und C. T. Druehl, „When Is a Disruptive Innovation Disruptive?“, *Journal of Product Innovation Management*, Jg. 25, Nr. 4, S. 347–369, 2008, doi: 10.1111/j.1540-5885.2008.00306.x.

- [326] F. Dotsika und A. Watkins, „Identifying potentially disruptive trends by means of keyword network analysis“, *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 119, S. 114–127, 2017, doi: 10.1016/j.techfore.2017.03.020.
- [327] A. Momeni und K. Rost, „Identification and monitoring of possible disruptive technologies by patent-development paths and topic modeling“, *Technological Forecasting and Social Change*, Jg. 104, S. 16–29, 2016, doi: 10.1016/j.techfore.2015.12.003.
- [328] Reuters Staff, „BMW erwartet weiteren Gewinneinbruch - Sparkurs verschärft“, *Reuters*, 20. März 2019, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.reuters.com/article/deutschland-bmw-idDEKCN1R10UL>. Zugriff am: 7. Januar 2022.
- [329] P. Thomond und F. Lettice, „Disruptive Innovation Explored“ in *9th IPSE International Conference on Concurrent Engineering: Research and Applications, Cranfield, 27-31 July 2002*, 2002.
- [330] D. Nagy, J. Schuessler und A. Dubinsky, „Defining and identifying disruptive innovations“, *Industrial Marketing Management*, Jg. 57, S. 119–126, 2016, doi: 10.1016/j.indmarman.2015.11.017.
- [331] Bundesverband der Deutschen Industrie, *Deutschland 2030 - Zukunftsperspektiven der Wertschöpfung*. Berlin: BDI - Bundesverband der Deutschen Industrie e.V, 2016.
- [332] W. Bernhart und S. Riederle, „Automotive Disruption Radar #10: The bumpy road to autonomous driving“, Roland Berger GmbH, 2021.
- [333] P. Kleinheins und W. Meighörner, *Die grossen Zeppeline: Die Geschichte des Luftschiffbaus*, 3. Aufl. Berlin: Springer, 2005.
- [334] O. Schneck, *Risikomanagement: Grundlagen, Instrumente, Fallbeispiele*, 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2010.
- [335] W. Geiger und W. Kotte, *Handbuch Qualität: Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme — Perspektiven*, 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2008.
- [336] C. Ulrich und B. Hoxha, *Diskussion von Anwendungen von U-Shift mit der Ansprechperson der IHK Stuttgart für die Citylogistik*. Stuttgart.
- [337] C. Ulrich, *Diskussion von Anwendungen von U-Shift mit Mitarbeitenden der Stadtplanung Stuttgart*. Online.
- [338] Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Stadtplanung und Wohnen, Hg., „Revitalisierung und Neuausrichtung des Vaihinger Markts: Umsetzungskonzept“, BBE Handelsberatung GmbH, München, 2020.

- [339] IBA27, *AufentHaltestelle Zukunft, Bahnhof Stuttgart Vaihingen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iba27.de/projekt/aufenthaltstelle-bahnhof-stuttgart-vaihingen/> (Zugriff am: 20. August 2022).
- [340] IBA27, *Eiermann-Areal Quartiersentwicklung - IBA'27-Netz*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iba27.de/projekt/eiermann-areal/> (Zugriff am: 20. August 2022).
- [341] A. Hemmerich, „Aktueller Sachstand des Verkehrskonzepts SynergiePark“. Möhringen, 2. Juli 2020.
- [342] WIV Stuttgart e. V.; SSP Consult; Beratende Ingenieure GmbH, „WIV Befragung „Mobilität und Versorgung“: für den SynergiePark und die benachbarten Gewerbegebiete in Kooperation mit der Landeshauptstadt Stuttgart“, Stuttgart, 2020.
- [343] Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Stadtplanung und Stadterneuerung, „Verkehrsstrukturplan für den Stadtbezirk Vaihingen“ Anlage 1 zur GRDRs 551/2017, 2017.
- [344] C. Ulrich, „Vorstellung Anwendungen U-Shift in der 16. Sitzung der Arbeitsgruppe „Smart Mobility in a Smart City“ (IBA2027)“. Online, 23. Feb. 2021.
- [345] J. Weimer und C. Ulrich, „Vorstellung U-Shift in der 11. Sitzung der Arbeitsgruppe „Smart Mobility in a Smart City“ (IBA2027)“. Online, 28. Juli 2020.
- [346] S. Tritschler und M. Biechele, „Fortschreibung des VRS-Verkehrsmodells“. Stuttgart, 22. Jan. 2020.
- [347] Zentrale Auskunft Statistisches Amt Stuttgart (Komunis), „Einwohner in Stuttgart seit 1986 nach Altersgruppen“ 893, 2022.
- [348] H.-L. Oediger, F. Gwildis und I. Aufrecht, „Entwicklungskonzeption Wirtschaftsflächen für Stuttgart (EWS)“, Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Stadtplanung und Wohnen, Stuttgart, 2019.
- [349] Ministerium für Verkehr Baden-Württemberg, „ÖPNV-Strategie 2030 für Baden-Württemberg“, 2022.
- [350] *sankeymatic*, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/nowthis/sankeymatic/blob/main/LICENSE.txt>
- [351] TomTom International BV, *Stuttgart traffic report: TomTom Traffic Index*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/stuttgart-traffic/ (Zugriff am: 19. August 2022).
- [352] J. Hartleb, M. Friedrich und E. Richter, „Vehicle scheduling for on-demand vehicle fleets in macroscopic travel demand models“, *Transportation*, 2021, doi: 10.1007/s11116-021-10205-4.

- [353] M. Gehrke, „Fahrscheinfrei im ÖPNV – Eine Alternative für Großstädte?: Ein Maßnahmenortiment und die Realisierbarkeit in Berlin“, *IVP-Discussion Paper*, 2016, 2016.
- [354] H. Kipke und P. Schwentek, „Bewirkt Reurbanisierung Reisezeit- und Wohlstandsverluste?“, *Der Nahverkehr*, 2014, 2014.
- [355] S. Gumz, C. Nash und M. Jakob, „Bestimmung des Verkehrsaufkommens“ in *Lehrbuch, Verkehrsplanung für Einzelhandelsstandorte: Ein Praxisleitfaden*, S. Gumz, C. Nash und M. Jakob, Hg., Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2020, S. 81–130, doi: 10.1007/978-3-658-28859-4_4.
- [356] OECD und ITF, „Urban Mobility System Upgrade: How shared self-driving cars could change city traffic“, International Transport Forum (ITF) - Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), 2015.
- [357] T. J. Ryley, P. A. Stanley, M. P. Enoch, A. M. Zanni und M. A. Quddus, „Investigating the contribution of Demand Responsive Transport to a sustainable local public transport system“, *Research in Transportation Economics*, Jg. 48, S. 364–372, 2014, doi: 10.1016/j.retrec.2014.09.064.
- [358] C. Wagner und M. Schmechtig, „Moderne ÖPNV-Infrastruktur als Garant ökonomischer Reisezeiten“, *Der Nahverkehr*, Jg. 2014, Nr. 11, S. 34–39, 2014.
- [359] K. Schaffner, *Wie entsteht ein Fahrplan? Die Taktgeberin erzählt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vbg.ch/story/die-taktgeberin/> (Zugriff am: 29. September 2022).
- [360] U. Weidmann, „Grundlagen zur Berechnung der Fahrgastwechselzeit“, 1995.
- [361] G. Anderhub, R. Dorbritz und U. Weidmann, „Leistungsfähigkeitsbestimmung öffentlicher Verkehrssysteme“, 2008.
- [362] Destatis, „Körpermaße nach Altersgruppen und Geschlecht: Ergebnisse des Mikrozensus 2017“, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2019.
- [363] U. Müller-Steinfahrt *et al.*, „Green-City Plan Würzburg: Ergebnisse Umfrage und Interviews zur Aufnahme von Warenströmen innerhalb der Altstadt von Würzburg (PLZ 97070)“, Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, 2018.
- [364] G. Boeing, „OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks“, *Computers, Environment and Urban Systems*, Jg. 65, S. 126–139, 2017, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004.
- [365] J. D. Hunter, „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“, *Comput. Sci. Eng.*, Jg. 9, Nr. 3, S. 90–95, 2007, doi: 10.1109/MCSE.2007.55.
- [366] *GeoPandas: Python tools for geographic data*, 2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/geopandas/geopandas>

- [367] *Shapely*. 1.8.0. Zenodo, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/shapely/shapely>
- [368] Statistisches Bundesamt (Destatis), „Unternehmen, Beschäftigte, Umsatz und weitere betriebs- und volkswirtschaftliche Kennzahlen im Gastgewerbe: Deutschland, Jahre, Wirtschaftszweige: Jahresstatistik im Gastgewerbe Deutschland“ 45342-0001, 2022.
- [369] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung und Kraftfahrt-Bundesamt, „Verkehr in Zahlen 2020/2021: 49. Jahrgang“, Flensburg, 2020.
- [370] Institut der deutschen Wirtschaft Köln e. V., „Faktencheck Güterverkehr in Deutschland“, 2021.
- [371] Statistisches Bundesamt (Destatis), „Bevölkerung: Deutschland, Stichtag, Altersjahre, Nationalität, Geschlecht, Familienstand: Stichtag 31.12.2021“ 12411-0008, 2021.
- [372] Zentrale Auskunft Statistisches Amt Stuttgart (Komunis), „Fortgeschriebene Einwohnerzahlen in Stuttgart 2021 nach Geschlecht, Staatsangehörigkeit, Veränderungen zum Monat des Vorjahres und Stadtteilen“ 12396, 2022.
- [373] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Verkehrs- und Unfalldaten: Kurzzusammenstellung der Entwicklung in Deutschland“, Bergisch Gladbach, 2021.
- [374] Landeshauptstadt Stuttgart, Hg., „Datenkompass Stadtbezirke Stuttgart: Auszug für Stuttgart-Vaihingen“, Stuttgart, Statistik und Informationsmanagement Themenhefte, 2020.
- [375] K. Kurzweg, „GWA - Aktiv im Stadtteil, Projekt Gemeinwesenarbeit Lauchhau-Lauchäcker: Abschlussbericht 2008“, Jugendamt Stuttgart, 2009.
- [376] WohnOrte², *Lauchhau*. [Online]. Verfügbar unter: <http://wohnoorte-stuttgart.de/lauchhau> (Zugriff am: 13. August 2022).
- [377] R. Bocksch, *Infografik: Etwa jeder fünfte Deutsche nutzt Packstationen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/infografik/26048/anteil-der-packstation-nutzer-in-ausgewahlten-laendern/> (Zugriff am: 13. August 2022).
- [378] Zentrale Auskunft Statistisches Amt Stuttgart (Komunis), „Privathaushalte in Stuttgart seit 1992 nach der Zahl der Personen und Stadtbezirken“ 4697, 2022.
- [379] F. Fehn, L. Hamm, R. Engelhardt und K. Bogenberger, „Ride-Parcel-Pooling: Insights to Integrated Passenger and Freight Transportation through a Customer Survey“ in *hEART 2022*, Leuven, 2022.
- [380] P. G. Szabó, M. C. Markót, T. Csendes, E. Specht, L. G. Casado und I. García, *New approaches to circle packing in a square: With program codes*. New York: Springer, 2007.

- [381] E. Specht, *Packomania: Zahlreiche Weltrekorde für Packungen von Kreisen*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.packomania.com/> (Zugriff am: 12. August 2022).
- [382] KEBA, Hg., „KePol Flex: Datenblatt“, 2022.
- [383] KEBA, Hg., „KePol FS Series: Datenblatt“, 2022.
- [384] A. Vastag, D. Kirsch, A. Bernsmann, C. Moll und M. Stockmann, Hg., *Potenziale einer geräuscharmen Nachtlogistik: Ergebnisse und Handlungsempfehlungen des Forschungsprojekts GeNaLog*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2017.
- [385] H. Jordan *et al.*, „Untersuchung: Veränderungen des gewerblichen Lieferverkehrs und dessen Auswirkungen auf die städtische Logistik: Abschlussbericht“, LNC LogisticNetwork Consultants GmbH; Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, 2020.
- [386] DPD; fka GmbH, „Autonomes Fahren in der Paketzustellung“, 2016.
- [387] F. P. Nolte, N. Wilken und C. Bartelt, „Rendezvous Delivery: Utilizing Autonomous Electric Vehicles to Improve the Efficiency of Last Mile Parcel Delivery in Urban Areas“ in *2021 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops and other Affiliated Events (PerCom Workshops)*, Kassel, Germany, 2021, S. 148–153, doi: 10.1109/PerComWorkshops51409.2021.9430987.
- [388] K. Glock *et al.*, „Autonome letzte Meile im Reallabor: Konzepte, Bewertung, Erprobung“ in *Transforming Mobility – What Next?*, H. Proff, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2022, S. 541–562, doi: 10.1007/978-3-658-36430-4_32.
- [389] H. Martin, *Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik ; mit 48 Tabellen*, 8. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [390] Paketda, *Tagesablauf eines DHL Paketzustellers: in Anlehnung an "Deutsche Post Medienservice 12/2011"*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.paketda.de/dhl/paketzusteller-tagesablauf.php> (Zugriff am: 9. November 2022).
- [391] BIEK und R. Bogdanski, „Kurzstudie Konsolidierte Zustellung“, 2019.
- [392] C. Dun, G. Horton und S. Kollamthodi, „Improvements to the definition of lifetime mileage of light duty vehicles: Report for European Commission – DG Climate Action“, Ricardo-AEA ED59296, 2015.
- [393] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), „Fahrzeugzulassungen (FZ): Besitzumschreibungen und Außerbetriebsetzungen von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter, Jahr 2021“, Flensburg FZ 16, 2022.
- [394] ADAC, „Fahrzeugdatenbank“, 2020.

- [395] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), „Verkehr in Kilometern (VK): Zeitreihe, Jahre 2014 - 2021“, Flensburg, 2022.
- [396] C. Macharis, P. Lebeau, J. Van Mierlo und K. Lebeau, „Electric versus conventional vehicles for logistics: A total cost of ownership“, *WEVJ*, Jg. 6, Nr. 4, S. 945–954, 2013, doi: 10.3390/wevj6040945.
- [397] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), „Fahrzeugzulassungen (FZ): Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Marken und Modellreihen Monatsergebnisse Dezember 2021“, Flensburg FZ 10, 2021.
- [398] Tesla, *Fahrzeuggarantie*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tesla.com/de_de/support/vehicle-warranty (Zugriff am: 6. Dezember 2022).
- [399] P. Schall, S. Sigle und C. Ulrich, „Design Strategy for a Distributed Energy Storage in a Modular Mover“ in *2021 Sixteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Monte-Carlo, Monaco, 2021, S. 1–5, doi: 10.1109/EVER52347.2021.9456606.
- [400] N. Mrdovic, „Potentialauswertung zu Konzeptidee "Verteiltes Batteriesystem": Ergebnisse des Arbeitspakets 3400 (MST3400-06) im Projekt U-Shift II“, Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart, 2022.
- [401] M. Grünhäuser *et al.*, „Machbarkeitsstudie Zulassungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), 2020.
- [402] C. Malaquin und A. Bonnabel, „Radar and Wireless for Automotive: Markets and Technology Trends 2019“, Yole Développement, 2019.
- [403] Agora Verkehrswende, „Auto tankt Internet: Auswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens auf den -Energieverbrauch von Fahrzeugen, Datenübertragung und Infrastruktur“, 2020.
- [404] IDTechEx, „Automotive Radar 2022-2042“, 2022.
- [405] Destatis, „Arbeitnehmerverdienste - Fachserie 16 Reihe 2.3 - 2021“, 2022.
- [406] A. Sachs, J. Ambros, J. Limbers, S. Moog und H. Weinelt, „Lohneinkommens-entwicklungen 2025“, Bertelsmann Stiftung, 2020.
- [407] F. Unterlohner und T. Earl, „Dekarbonisierung des Lkw Fernverkehrs in Deutschland“, Transport & Environment, Brüssel, 2021.
- [408] *Erlass betr. betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer von Ladeinfrastruktur für E-Mobilität: FM Thüringen S 1551 - 65- 25.11; 53840/2021*, 2021.
- [409] Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V., *Modellrechnungen zur Kostenentwicklung im Güterkraftverkehr*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bgl-ev.de/web/der_bgl/informationen/branchenkostenentwicklung.htm?v=2#form (Zugriff am: 12. Januar 2023).

- [410] T. Kempcke, „Studie: Transport in der Handelslogistik“, EHI Retail Institute, 2018.
- [411] Continental AG, „Continental Mobility Study 2016“, 2016.
- [412] T. Puls, *Externe Kosten am Beispiel des deutschen Straßenverkehrs: Ökonomisches Konzept, politische Relevanz, praktische Möglichkeiten und Grenzen*. Köln: IW Inst. der Dt. Wirtschaft, 2009.
- [413] P. Girardi, A. Gargiulo und P. C. Brambilla, „A comparative LCA of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle using the appropriate power mix: the Italian case study“, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Jg. 20, Nr. 8, S. 1127–1142, 2015, doi: 10.1007/s11367-015-0903-x.
- [414] J. Lieberei und S. H. Gheewala, „Resource depletion assessment of renewable electricity generation technologies—comparison of life cycle impact assessment methods with focus on mineral resources“, *Int J Life Cycle Assess*, Jg. 22, Nr. 2, S. 185–198, 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1152-3.
- [415] H. E. Friedrich, Hg., *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*, 2. Aufl. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017.
- [416] E. Glogic, G. Sonnemann und S. B. Young, „Environmental Trade-Offs of Downcycling in Circular Economy: Combining Life Cycle Assessment and Material Circularity Indicator to Inform Circularity Strategies for Alkaline Batteries“, *Sustainability*, Jg. 13, Nr. 3, S. 1040, 2021, doi: 10.3390/su13031040.
- [417] D. M. Woisetschläger, „Consumer Perceptions of Automated Driving Technologies: An Examination of Use Cases and Branding Strategies“ in *Autonomous Driving*, M. Maurer, J. C. Gerdes, B. Lenz und H. Winner, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, S. 687–706, doi: 10.1007/978-3-662-48847-8_32.
- [418] G. Meyer und S. Deix, „Research and Innovation for Automated Driving in Germany and Europe“ in *Lecture Notes in Mobility, Road vehicle automation: Based on an expert workshop organized by the Transportation Research Board ; the Second Annual Workshop on Road Vehicle Automation, which was hosted by Stanford University on July 15 - 19, 2013*, G. Meyer und S. Beiker, Hg., Cham: Springer, 2014, S. 71–81, doi: 10.1007/978-3-319-05990-7_7.
- [419] T. J. Gordon und M. Lidberg, „Automated driving and autonomous functions on road vehicles“, *Vehicle System Dynamics*, Jg. 53, Nr. 7, S. 958–994, 2015, doi: 10.1080/00423114.2015.1037774.
- [420] *Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, SAE J3016, SAE International, 2018.
- [421] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), *Pressemitteilung 49/2021: KBA erteilt erste Genehmigung zum automatisierten Fahren*. Flensburg, 2021.

- [422] T. Haslwanter, *An Introduction to Statistics with Python*. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [423] M. Waskom, „seaborn: statistical data visualization“, *JOSS*, Jg. 6, Nr. 60, S. 3021, 2021, doi: 10.21105/joss.03021.
- [424] C.-C. Hsu und B. A. Sandford, „Minimizing Non-Response in The Delphi Process: How to Respond to Non-Response“, *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, Nr. 12, 2007, Art. no. 17, doi: 10.7275/BY88-4025.
- [425] F. Norouzian, E. G. Hoare, E. Marchetti, M. Cherniakov und M. Gashinova, „Next Generation, Low-THz Automotive Radar – the potential for frequencies above 100 GHz“ in *2019 20th International Radar Symposium (IRS)*, Ulm, Germany, 2019, S. 1–7, doi: 10.23919/IRS.2019.8767461.
- [426] G. Gallego *et al.*, „Event-based Vision: A Survey“, *arXiv:1904.08405 [cs]*, 2019.
- [427] B. Brown *et al.*, „Hyperspectral Technology for Autonomous Vehicles“, University of California, Berkeley, 2020.
- [428] ERTRAC, „Connected Automated Driving Roadmap“, ERTRAC Working Group "Connectivity and Automated Driving, Brussels, 2019.
- [429] S. Liu *et al.*, „Brief Industry Paper: The Necessity of Adaptive Data Fusion in Infrastructure-Augmented Autonomous Driving System“ in *2022 IEEE 28th Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS)*, Milano, Italy, 2022, S. 293–296, doi: 10.1109/RTAS54340.2022.00031.
- [430] Industrie- und Handelskammer (IHK) - Region Stuttgart, Hg., „City-Logistik neu gedacht: Impulse für das Stuttgarter Rosensteinviertel“, 2020.
- [431] G. Cliquet, „Retailing in Western Europe: Structures and Development Trends“ in *Handbuch Handel: Strategien - Perspektiven - internationaler Wettbewerb*, J. Zentes, Hg., 1 Aufl., Wiesbaden: Gabler, 2006, S. 112–138, doi: 10.1007/978-3-8349-9160-7_6.
- [432] C. Ulrich, „Stakeholder Workshop (Anwender) mit Vertretern der Verbände BIEK, HBW, VSL und VDV“ in *Machbarkeitsstudie Fahrzeugkonzept U-Shift: Modular Electrified Capsule and Platform (ModECaP)*, DLR-FK, FKFS, KIT-ITIV, KIT-FAST und UULM-MRM, Hg., 2019.
- [433] R. Hahn, C. Ulrich, M. Feinauer, M. Münster und G. Kopp, „UrMo Digital - Fahrzeugkonzepte für multimodale Transportketten: Beschreibung, Visualisierung und Bewertung eines optimierten „on-the-road“-modularen Fahrzeugkonzepts im Kontext zukünftiger Mobilitäts- und Transportkonzepte“, DLR, 2020.
- [434] E. Scholz, „Customer-focused development of light commercial vehicles for various applications“, 2016.
- [435] fka GmbH, *Benchmarking-Datenbank*. [Online]. Verfügbar unter: <https://benchmarking.fka.de/> (Zugriff am: 3. September 2021).

- [436] S. Dietrich, „Modularisierung und Funktionsintegration am Beispiel der Automobilkarosserie: Ein Beitrag zur Entwicklung, Bewertung und Lösungsauswahl“. Dissertation, Technische Universität München (TUM), 2011.
- [437] G. Erixon, „Modular function deployment: A method for product modularisation“. Dissertation, Department of Manufacturing Systems, The Royal Institute of Technology, Stockholm, 1998.
- [438] H. Quak, N. Nesterova und T. van Rooijen, „Possibilities and Barriers for Using Electric-powered Vehicles in City Logistics Practice“, *Transportation Research Procedia*, Jg. 12, S. 157–169, 2016, doi: 10.1016/j.trpro.2016.02.055.
- [439] D. Lohse und W. Schnabel, *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Band 2; Verkehrsplanung*, 3. Aufl. s.l.: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [440] D. Kaszubowski, „A Method for the Evaluation of Urban Freight Transport Models as a Tool for Improving the Delivery of Sustainable Urban Transport Policy“, *Sustainability*, Jg. 11, Nr. 6, 2019, doi: 10.3390/su11061535.
- [441] Destatis, *Verbraucherpreisindex (inkl. Veränderungsraten): Deutschland, Jahre*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=tabelleErgebnis&selectionname=61111-0001&startjahr=1991#ab-readcrumb> (Zugriff am: 5. Januar 2021).
- [442] Deutsche Bundesbank, *Jahresdurchschnitte: Zeitreihe Euro-Referenzkurse der Europäischen Zentralbank*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesbank.de/dynamic/action/de/statistiken/zeitreihen-datenbanken/zeitreihen-datenbank/759778/759778?listId=www_s331_b01012_1 (Zugriff am: 5. Januar 2021).
- [443] P. Noll, *Statistisches Matching mit Fuzzy Logic: Theorie und Anwendung in Sozial- und Wirtschaftswissenschaften*. Zugl.: Marburg, Philipps-Univ., Diss., 2009, 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.
- [444] R. Kruse, C. Borgelt, C. Braune, F. Klawonn, C. Moewes und M. Steinbrecher, *Computational Intelligence*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [445] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), „Results VEU II: Vector21 Simulationsergebnis“. Excel-Datentabelle, 2022.
- [446] Shell Deutschland Oil GmbH, Hg., „Shell PKW-Szenarien bis 2040“, Shell Deutschland Oil GmbH; Prognos AG, Hamburg, 2022.
- [447] A. W. Kunith, *Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs: Technologiebewertung für den kosteneffizienten Betrieb emissionsfreier Bussysteme*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [448] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), „Fahrzeugzulassungen (FZ): Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Marken und Modellreihen“. Auswertung der Modellreihen für die Jahre 2015–2021, Flensburg, 2022.

- [449] C. Ulrich *et al.*, „Technologiekalender Strukturwandel Automobil Baden-Württemberg (TKBW) - Technologiesteckbriefe“, DLR-FK; IMU Institut GmbH; KIT-IPEK; ZSW, 2020.

Anhang

Der Anhang der Arbeit umfasst die folgenden Abschnitte:

A	Literaturverweise für den Stand der Forschung	231
B	Spezifikationen am Markt verfügbarer Fahrzeuge der Sprinter-Klasse	236
C	Marktübersicht neuartiger Fahrzeugkonzepte	237
D	Ergänzungen zu Umfeld und Quantifizierung der Einsatzszenarien	238
E	Online-Expertenbefragung	239
F	Bewertungsgrundlage der erweiterten Nutzenanalyse	245
G	Technische Merkmale von U-Shift	261
H	Wechselkurse und Inflationsrate	264
I	Fuzzylogik zur Restwertermittlung	264
J	Herstellkosten der Fahrzeugkonzepte	266
K	Wirkkategorien und Stoffstrommodelle für die Ökobilanzierung	270
L	Ergänzungen zur prospektiven Technologieentwicklung	273
M	Bewertungsgrundlage der Analyse zum disruptiven Potenzial	289

A Literaturverweise für den Stand der Forschung

Tabelle A.1: Stand der Forschung – Literaturverweise für die Darstellung in Abbildung 1.1	
Pos.	Quellen
aa	Vilaça et al. 2022
ab	Gawron et al. 2018; Gottwald Port Technology GmbH et al. 2011; Helmers et al. 2020; Paulino et al. 2018; Sharma et al. 2013
b	Eberle 2000; Kolke 2004; Yang et al. 2018
c	Sen et al. 2020; Lee und Thomas 2017
da	Fehn et al. 2021; Martinez und Viegas 2017
db	Field et al. 2000; Krail et al. 2019
dc	Wadud et al. 2016
ea	Schoemaker et al. 2006; Bruzzone et al. 2021
eb	Thiel et al. 2010; van Vliet et al. 2011; Greenblatt und Shaheen 2015
fa	Karabasoglu und Michalek 2013; Kunith 2017; Megyesi 2017; Seeliger et al. 2016; Deniz 2022a; Borgato et al. 2021; Wietschel et al. 2019; Klepatz et al. 2021
fb	Wietschel et al. 2017
ga	van Duin et al. 2020; Wątróbski et al. 2017
gb	van der Tholen et al. 2021; Nguyen et al. 2015; Beirigo et al. 2018; Fehn et al. 2022; Fagnant und Kockelman 2014; Grahle et al. 2020; Thaller 2018; van Duin et al. 2020
ha	Mourad 2019; Zhang et al. 2022; Hatzenbühler et al. 2022a; Arnold et al. 2018; Flämig et al. 2020; Gevaers et al. 2011; Quak und Koster 2009; Friedrich und Hartl 2016
hb	Daganzo und Newell 1985
hc	Plötz et al. 2013
ia	Bösch 2018; Deniz 2022b
ib	Kleiner 2020
ic	Klumpp et al. 2014; Propfe et al. 2012; Sharma et al. 2012; Wadud 2017
j	Schwerdfeger und Boysen 2022; Schlenther et al. 2020; Deineko et al. 2023; Kortekaas et al. 2023
k	Hatzenbühler et al. 2022b; Meinhardt et al. 2022; Chen et al. 2019
l	Österle et al. 2022

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Das folgende Verzeichnis ergänzt die Quellennachweise in Tabelle A.1; im Literaturverzeichnis der Arbeit werden diese Quellen nicht aufgelistet:

Arnold, F.; Cardenas, I.; Sörensen, K.; Dewulf, W. (2018): Simulation of B2C e-commerce distribution in Antwerp using cargo bikes and delivery points. In: Eur. Transp. Res. Rev. 10 (1), S. 1–13. DOI: 10.1007/s12544-017-0272-6.

Beirigo, Breno A.; Schulte, Frederik; Negenborn, Rudy R. (2018): Integrating People and Freight Transportation Using Shared Autonomous Vehicles with Compartments. In: IFAC-PapersOnLine 51 (9), S. 392–397. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.07.064.

- Borgato, Stefano; Fermi, Francesca; Chirico, Francesco; Bosetti, Simone (2021): Study on costs and benefits of the sustainable urban mobility transition. D3: Final Report long version). EIT Urban Mobility. TRT Trasporti e Territorio. Mailand, Italien. Online verfügbar unter <http://www.eiturbanmobility.eu/>, zuletzt geprüft am 16.08.2022.
- Bösch, Patrick M. (2018): Autonomous Vehicles - The next Revolution in Mobility. ETH Zürich.
- Bruzzone, Francesco; Cavallaro, Federico; Nocera, Silvio (2021): The integration of passenger and freight transport for first-last mile operations. In: *Transport Policy* 100, S. 31–48.
- Chen, Zhiwei; Li, Xiaopeng; Zhou, Xuesong (2019): Operational design for shuttle systems with modular vehicles under oversaturated traffic: Continuous modeling method. In: *Transportation Research Part B: Methodological*.
- Daganzo, Carlos F.; Newell, Gordon F. (1985): Physical distribution from a warehouse: Vehicle coverage and inventory levels. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 19 5), S. 397–407. DOI: 10.1016/0191-2615(85)90053-0.
- Deineko, Elija; Knitschky, Gunnar; Rischke, Daniela (2023): Exploratory Analysis of Transportation System for Modular Vehicle Concept Operated as Passenger and Goods Transport Using Continuum Approximation Techniques. In: Uwe Clausen und Marius Dellbrügge (Hg.): *Advances in Resilient and Sustainable Transport*. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Logistics), S. 223–240.
- Deniz, Özcan (2022a): Development of a scenario model for the simulation of the technology diffusion in the commercial vehicle market in Germany. In: 35th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition EVS35). Oslo.
- Deniz, Özcan (2022b): Potentials of electric freight vehicles in combination with urban consolidation centres for last-mile delivery. In: 35th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition EVS35). Oslo.
- Eberle, Reinhard Lorenz (2000): *Methodik zur ganzheitlichen Bilanzierung im Automobilbau*. Technische Universität Berlin, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Fagnant, Daniel J.; Kockelman, Kara M. (2014): The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 40, S. 1–13. DOI: 10.1016/j.trc.2013.12.001.
- Fehn, Fabian; Engelhardt, Roman; Bogenberger, Klaus (2021): Ride-Parcel-Pooling - Assessment of the Potential in Combining On-Demand Mobility and City Logistics. In: 2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). 2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). Indianapolis, IN, USA, 19.09.2021 - 22.09.2021: IEEE, S. 3366–3372.
- Fehn, Fabian; Engelhardt, Roman; Dandl, Florian; Bogenberger, Klaus; Busch, Fritz (2022): Integrating Parcel Deliveries into a Ride-Pooling Service -- An Agent-Based Simulation Study. Online verfügbar unter <https://arxiv.org/pdf/2205.04718.pdf>.
- Field, Frank; Kirchain, Randolph; Clark, Joel (2000): Life-Cycle Assessment and Temporal Distributions of Emissions: Developing a Fleet-Based Analysis. In: *Journal of Industrial Ecology* 4 2), S. 71–91. DOI: 10.1162/108819800569816.
- Flämig, Heike; Lunkeit, Sandra; Fieltch, Patrik; Müller, Stephan; Thaller, Carina; Liedtke, Gernot et al. (2020): ATLaS. Projektbericht des Verbundvorhabens. Technische Universität Hamburg TUHH); Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. DLR); DroneMasters Boost GmbH; Logistiknetz Berlin-Brandenburg. Hamburg.
- Friedrich, Markus; Hartl, Maximilian (2016): MEGAFON. Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen. Stuttgart.
- Gawron, James H.; Keoleian, Gregory A.; Kleine, Robert D. de; Wallington, Timothy J.; Kim, Hyung Chul (2018): Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing

- Subsystem and Vehicle Level Effects. In: *Environmental Science & Technology* 52 5), S. 3249–3256, zuletzt geprüft am 10.12.2019.
- Gevaers, Roel; van de Voorde, Eddy; Vanellander, Thierry (2011): Characteristics and Typology of Last-mile Logistics from an Innovation Perspective in an Urban Context. In: Cathy Macharis und Sandra Melo Hg.): *City Distribution and Urban Freight Transport. Multiple perspectives*: Edward Elgar Publishing.
- Gottwald Port Technology GmbH; HHLA Container-Terminal Altenwerder GmbH; ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH; RWTH Aachen - Institut für Kraftfahrzeuge (2011): *Forschung und Entwicklung batteriebetriebener Schwerlastfahrzeuge AGV) und deren Erprobung in einem Feldversuch im Container-Terminal Altenwerder in Hamburg*.
- Grahle, A.; Song, Y.-W.; Brüske, K.; Bender, B.; Göhlich, D. (2020): Autonomous shuttles for urban mobility on demand applications - ecosystem dependent requirement elicitation. In: *Proc. Des. Soc.: Des. Conf. 1*, S. 887–896. DOI: 10.1017/dsd.2020.100.
- Greenblatt, Jeffery B.; Shaheen, Susan (2015): Automated Vehicles, On-Demand Mobility, and Environmental Impacts. In: *Current Sustainable/Renewable Energy Reports* 2 3), S. 74–81. DOI: 10.1007/s40518-015-0038-5.
- Hatzenbühler, Jonas; Jenelius, Erik; Gidófalvi, Győző; Cats, Oded (2022a): Modular Vehicle Routing for Combined Passenger and Freight Transport. Preprint. In: TR-A – Special Issue: Integration of passenger and freight transport. Online verfügbar unter <http://arxiv.org/pdf/2209.01461v1>.
- Hatzenbühler, Jonas; Jenelius, Erik; Gidófalvi, Győző; Cats, Oded (2022b): Multi-purpose Pickup and Delivery Problem for Combined Passenger and Freight Transport. Preprint submitted to *EURO Journal on Transportation and Logistics*.
- Helmers, Eckard; Dietz, Johannes; Weiss, Martin (2020): Sensitivity Analysis in the Life-Cycle Assessment of Electric vs. Combustion Engine Cars under Approximate Real-World Conditions. In: *Sustainability* 12 3), S. 1241. DOI: 10.3390/su12031241.
- Karabasoglu, Orkun; Michalek, Jeremy (2013): Influence of driving patterns on life cycle cost and emissions of hybrid and plug-in electric vehicle powertrains. In: *Energy Policy* 60, S. 445–461. DOI: 10.1016/j.enpol.2013.03.047.
- Kleiner, Florian (2020): *Nutzfahrzeugkonzepte der Zukunft. Systemische Technologiebewertung konkurrierender Antriebskonzepte*. Dissertation. Universität Stuttgart. Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen.
- Klepatz, Kevin; Konradt, Swantje; Tempelhagen, Robin; Rottengruber, Hermann (2021): Systemvergleich CO₂-freier Nutzfahrzeugantriebe. In: Karsten Berns, Klaus Dressler, Ralf Kalmar, Nicole Stephan, Roman Teutsch und Martin Thul Hg.): *Commercial Vehicle Technology 2020/2021*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden Proceedings), S. 171–191.
- Klumpp, M.; Witte, C.; Gries, S.; Zelewski, S. (2014): Investitions- und Änderungsbereiche in Logistikprozessen. In: Heike Proff Hg.): *Radikale Innovationen in der Mobilität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 143–157.
- Kolke, Reinhard (2004): *Vergleich der Umweltverträglichkeit neuer Technologien im Strassenverkehr*. Dissertation. Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg.
- Kortekaas, Joris J. A.; Beirigo, Breno A.; Schulte, Frederik (2023): Beyond Cargo Hitching: Combined People and Freight Transport Using Dynamically Configurable Autonomous Vehicles. In: Joachim R. Daduna, Gernot Liedtke, Xiaoning Shi und Stefan Voß (Hg.): *Computational Logistics. 14th International Conference, ICCL 2023, Berlin, Germany, September 6–8, 2023, Proceedings*. 1st ed. 2023. Cham: Springer Nature Switzerland; Imprint Springer (Lecture Notes in Computer Science, 14239).
- Krail, Michael; Hellekes, Jens; Schneider, Uta; Dütschke, Elisabeth; Schellert, Maximilian; Rüdiger, David et al. (2019): *Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr*. Karlsruhe.

- Kunith, Alexander W. (2017): Elektrifizierung des urbanen öffentlichen Busverkehrs. Technologiebewertung für den kosteneffizienten Betrieb emissionsfreier Bussysteme. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Lee, Dong-Yeon; Thomas, Valerie M. (2017): Parametric modeling approach for economic and environmental life cycle assessment of medium-duty truck electrification. In: *Journal of Cleaner Production* 142, S. 3300–3321. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.10.139.
- Martinez, Luis M.; Viegas, José Manuel (2017): Assessing the impacts of deploying a shared self-driving urban mobility system: An agent-based model applied to the city of Lisbon, Portugal. In: *International Journal of Transportation Science and Technology* 6 (1), S. 13–27. DOI: 10.1016/j.ijst.2017.05.005.
- Megyesi, Péter (2017): Methode zur Einbindung realer Nutzerprofile in die ökologische und ökonomische Bewertung von Fahrzeugkonzepten. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie. Online verfügbar unter <https://www.ksp.kit.edu/9783731508083>.
- Meinhardt, Simon; Schlenther, Tilmann; Martins-Turner, Kai; Maciejewski, Michal (2022): Simulation of On-Demand Vehicles that Serve both Person and Freight Transport. In: *The 13th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies ANT*. Porto, Portugal.
- Mourad, Abood (2019): The synchronization of shared mobility flows in urban environments. Dissertation. Université Paris Saclay.
- Nguyen, Ngoc-Quang; Nghiem, Nguyen-Viet-Dung; DO, Phan-Thuan; LE, Khac-Tuan; Nguyen, Minh-Son; MUKAI, Naoto (2015): People and parcels sharing a taxi for Tokyo city. In: Huynh Quyet Thang, Le Anh Phuong, Luc de Raedt, Yves Deville, Marc Bui, Truong Thi Dieu Linh et al. (Hg.): *Proceedings of the Sixth International Symposium on Information and Communication Technology*: ACM, S. 90–97.
- Österle, Ines; Ulrich, Christian; Herwartz-Polster, Sebastian; Sigle, Sebastian; Weimer, Jürgen; Conzelmann, Marcus et al. (2022): Benefits and costs of shared, modular automated vehicles for freight and passenger transport: the case of U-Shift. In: *Transportation Planning and Technology*. DOI: 10.1080/03081060.2022.2094930.
- Paulino, Filipe; Pina, André; Baptista, Patrícia (2018): Evaluation of Alternatives for the Passenger Road Transport Sector in Europe: A Life-Cycle Assessment Approach. In: *Environments* 5 (2), S. 21. DOI: 10.3390/environments5020021.
- Plötz, Patrick; Gnann, Till; Kühn, André; Wietschel Martin (2013): Markthochlaufszszenarien für Elektrofahrzeuge. Fraunhofer ISI, zuletzt geprüft am 24.12.2020.
- Propfe, Bernd; Redelbach, Martin; Santini, Danilo; Friedrich, Horst (2012): Cost analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicles including Maintenance & Repair Costs and Resale Values. In: *WEVJ* 5 (4), S. 886–895.
- Quak, H. J.; Koster, M. B. M. de (2009): Delivering Goods in Urban Areas: How to Deal with Urban Policy Restrictions and the Environment. In: *Transportation Science* 43 (2), S. 211–227. DOI: 10.1287/trsc.1080.0235.
- Schlenther, Tilmann; Martins-Turner, Kai; Bischoff, Joschka Felix; Nagel, Kai (2020): Potential of Private Autonomous Vehicles for Parcel Delivery. In: *Transportation Research Record* 2674 (11), S. 520–531. DOI: 10.1177/0361198120949878.
- Schoemaker, Jarl; Allen, Julian; Huschebeck, Marcel; Monigl, Janos (2006): Quantification of Urban Freight Transport Effects I BESTUFS II).
- Schwerdfeger, Stefan; Boysen, Nils (2022): Who moves the locker? A benchmark study of alternative mobile parcel locker concepts. Friedrich-Schiller-Universität Jena.
- Seeliger, Andreas; Jeschull, Stefan; Krönauer, Bernd; Limberg, Stefan; Schreiner, Christina; Souza, Mariana Albuquerque C. de; Verza, Melanie (2016): Elektrobusse im ÖPNV. Eine technisch/wirtschaftliche Analyse unter Berücksichtigung praktischer Anwendungsbeispiele. Krefeld.
- Sen, Burak; Kucukvar, Murat; Onat, Nuri C.; Tatari, Omer (2020): Life cycle sustainability assessment of autonomous heavy-duty trucks. In: *Journal of Industrial Ecology* 24 (1), S. 149–164. DOI: 10.1111/jiec.12964.

- Sharma, R.; Manzie, C.; Bessede, M.; Brear, M. J.; Crawford, R. H. (2012): Conventional, hybrid and electric vehicles for Australian driving conditions – Part 1: Technical and financial analysis. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 25, S. 238–249. DOI: 10.1016/j.trc.2012.06.003.
- Sharma, R.; Manzie, C.; Bessede, M.; Crawford, R. H.; Brear, M. J. (2013): Conventional, hybrid and electric vehicles for Australian driving conditions. Part 2: Life cycle CO₂-e emissions. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 28, S. 63–73. DOI: 10.1016/j.trc.2012.12.011.
- Thaller, Carina (2018): Rückkopplung einer Makroskopischen Extrapolation mit einer Mikroskopischen Verkehrssimulation. Dissertation. TU Dortmund.
- Thiel, Christian; Perujo, Adolfo; Mercier, Arnaud (2010): Cost and CO₂ aspects of future vehicle options in Europe under new energy policy scenarios. In: *Energy Policy* 38 (11), S. 7142–7151. DOI: 10.1016/j.enpol.2010.07.034.
- van der Tholen, Max; Beirigo, Breno A.; Jovanova, Jovana; Schulte, Frederik (2021): The Share-A-Ride Problem with Integrated Routing and Design Decisions: The Case of Mixed-Purpose Shared Autonomous Vehicles. In: Martijn Mes, Eduardo Lalla-Ruiz und Stefan Voß Hg.): *Computational Logistics*, Bd. 13004. Cham: Springer International Publishing Lecture Notes in Computer Science), S. 347–361.
- van Duin, J.H.R.; Wiegmans, B. W.; van Arem, B.; van Amstel, Y. (2020): From home delivery to parcel lockers: a case study in Amsterdam. In: *Transportation Research Procedia* 46, S. 37–44. DOI: 10.1016/j.trpro.2020.03.161.
- van Vliet, Oscar; Brouwer, Anne Sjoerd; Kuramochi, Takeshi; van den Broek, Machteld; Faaij, André (2011): Energy use, cost and CO₂ emissions of electric cars. In: *Journal of Power Sources* 196 (4), S. 2298–2310. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2010.09.119.
- Vilaça, Mariana; Santos, Gonçalo; Oliveira, Mónica S.A.; Coelho, Margarida C.; Correia, Gonçalo H.A. (2022): Life cycle assessment of shared and private use of automated and electric vehicles on inter-urban mobility. In: *Applied Energy* 310, S. 118589. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.118589.
- Wadud, Zia (2017): Fully automated vehicles: A cost of ownership analysis to inform early adoption. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 101, S. 163–176. DOI: 10.1016/j.tra.2017.05.005.
- Wadud, Zia; MacKenzie, Don; Leiby, Paul (2016): Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 86, S. 1–18. DOI: 10.1016/j.tra.2015.12.001.
- Wątróbski, Jarosław; Małecki, Krzysztof; Kijewska, Kinga; Iwan, Stanisław; Karczmarczyk, Artur; Thompson, Russell (2017): Multi-Criteria Analysis of Electric Vans for City Logistics. In: *Sustainability* 9 (8), S. 1453. DOI: 10.3390/su9081453.
- Wietschel, Martin; Gnann, Till; Kühn, André; Plötz, Patrick; Moll, Cornelius; Speth, Christoph et al. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur BMVI).
- Wietschel, Martin; Timmerberg, Sebastian; Ashley-Belbin, Natalja (2019): Klimabilanz, Kosten und Potenziale verschiedener Kraftstoffarten und Antriebssysteme für Pkw und Lkw. Fraunhofer ISI.
- Yang, Lei; Hao, Caixia; Chai, Yina (2018): Life Cycle Assessment of Commercial Delivery Trucks: Diesel, Plug-In Electric, and Battery-Swap Electric. In: *Sustainability* 10 (12), S. 4547. DOI: 10.3390/su10124547.
- Zhang, Shiyao; Markos, Christos; Yu, James J. Q. (2022): Autonomous Vehicle Intelligent System: Joint Ride-Sharing and Parcel Delivery Strategy. In: *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.* 23 (10), S. 18466–18477. DOI: 10.1109/TITS.2022.3162609.

B Spezifikationen am Markt verfügbarer Fahrzeuge der Sprinter-Klasse

Technische Spezifikationen aktuell am Markt verfügbarer Fahrzeugmodelle der Sprinter-Klasse werden aus der ADAC-Fahrzeugdatenbank [394] ausgewertet: Tabelle B.1. Die Datenbank wird nach elektrischen (Klein-) Transportern mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 3,00–4,25 t mit einer aktiven Baureihe im April 2021 gefiltert: 99 Fahrzeugmodelle von 9 Herstellern.

Tabelle B.1: Statistische Auswertung am Markt verfügbarer Fahrzeuge der Sprinter-Klasse nach Perzentilen										
Parameter	Einheit	Minimum	5.	10.	25.	50. (Median)	75.	90.	95.	Maximum
Verbrauch (WLTP)	kWh/100 km	21,7	21,7	21,7	24,4	26,9	32,9	34,9	36,6	38,6
Reichweite (WLTP)	km	42	150	158	212	231	316	329	329	329
Grundpreis	EUR2021	41948	43836	44438	47839	52420	69592	87703	88501	92380
Batteriekapazität	kWh	33	33	41	47	50	75	79	79	79
Leergewicht	kg	1901	1937	1949	1993	2128	2440	2680	2738	2810
Zul. Gesamtgewicht	kg	3015	3045	3053	3100	3100	3500	4250	4250	4250
Nutzlast	Kg	690	765	908	929	1063	1151	1497	1738	1910
Leistung E-Motor	kW	57	57	85	90	100	100	100	100	100
Max. Geschwindigkeit	km/h	80	100	100	100	130	130	130	130	130
Länge	mm	4609,0	4959	4959	4959	5309	5494	6115	6363	6363
Breite	mm	1920	1920	1920	1920	2010	2050	2050	2070	2070
Höhe	mm	1890	1890	1895	1895	1935	2569	2599	2804	2834
Grundfläche	m ²	9,3	9,5	9,5	10,0	10,7	11,3	12,4	13,0	13,0

Quelle: Eigene Auswertung mit Daten von [394]

C Marktübersicht neuartiger Fahrzeugkonzepte

Tabelle C.1: Marktübersicht on-the-road integraler Fahrzeugkonzepte (Auswahl)		
Zweck	Flexible Mover	Integral Mover
Personen	Cristal (Lohr); Wegbahn (HMF)	42dot DRT; EZ10 (Easymile); META (e.Volution); microMAX (Rinspeed); Navya Shuttle; SEDRIC (VW)
Güter	Auto Duck Ducktrain; GH eCarrier	Nuro; SURUS (GM)
Personen oder Güter	NEXT Future Transportation	CLOUI (Paravan); Edit (Openmotors); e-Palette (Toyota); MOOVE People/ Cargo Mover; Schaeffler Mover; Urban Modular Vehicle (DLR); UNICARagil

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Tabelle C.2: Marktübersicht on-the-road modularer Fahrzeugkonzepte (Auswahl)		
<i>Fahrzeuge die bereits im Regelbetrieb eingesetzt werden oder wurden, sind mit einem Asterisk (*) gekennzeichnet; diese benötigen Fahrpersonal im Betrieb</i>		
Zweck	Infrastructure-based (ibm)	standalone (sam)
Personen	Pop.Up Next (Airbus, Italdesign)	Porsche S.A.V.E*; Sattelzugomnibus*
Güter	EZ-Pro (Renault); CitySnap (Rinspeed); AGV Containertransport (Konecranes)*; Clevon 1 (Cleveron); uPod (Udelv)	Autostrad (Kalmar)*; Cargoloader (Ruthmann)*; DiPP-R; Hubi (Heimann)*; MAX (ECA Group); Obelix (Fraunhofer IML); Sattelzug*; Wechselbrücke*
Personen oder Güter	CityBot (EDAG); ConnX (Leitner); MetroSnap (Rinspeed); microSNAP (Rinspeed); NXT (Scania); SPACe C (Panasonic); UpBus (RWTH)	Snap (Rinspeed); U-Shift (DLR); Urban Collëctif (Citroën); Vision Urbanetic (Mercedes-Benz)

Quelle: Eigene Zusammenstellung

D Ergänzungen zu Umfeld und Quantifizierung der Einsatzszenarien

Tabelle D.1: Konzepte für die Citylogistik (Auswahl)

Beschreibung der Konzepte sowie deren Potenzial und Herausforderungen

Ansatz	Beschreibung
White Label	Beim White-Label-Transport erfolgt die Belieferung nach einer Konsolidierung der Waren in einem Transitterminal am Stadtrand auf der urbanen letzten Meile ohne eine Markenzuordnung durch ein Generalunternehmen. Dadurch verlieren die bisherigen Transportdienstleister den Kontakt zu den Endkunden. Aus gesellschaftlicher und kommunaler Sicht wird dem Konzept jedoch Potenzial beigemessen. [5, 135]
UCC	In urbanen Konsolidierungszentren (UCC) werden Waren verschiedener Akteure gesammelt und für eine gemeinsame Zustellung gebietsspezifisch auf Fahrzeuge verteilt. Im Vergleich zu Mikrohub werden größere Gütermengen umgeschlagen. Jeder Umschlag bedeutet allerdings weiteren finanziellen und organisatorischen Aufwand. Demgegenüber steht die potenzielle Reduktion benötigter Lieferfahrzeuge. [15, S. 23, 102, 135]
Mikrohub	Ein Mikrohub/ -depot wird im Stadtgebiet errichtet, um Waren auf in der Regel umweltfreundlichere Transportmittel umzuschlagen. Damit können der urbane Verkehr potenziell entlastet und größere Zubringerfahrzeuge in Randzeiten verlagert werden. Allerdings werden Flächen benötigt, welche in Städten knapp sind, und jeder weitere Umschlag bedeutet finanziellen und organisatorischen Aufwand [109, 135, 150, 430].
Warenübergabesystem	Im Gegensatz zu den anderen Konzepten ist dies kein Bring-, sondern ein Holsystem, bei dem Empfänger Waren abholen. Paketstationen und Lebensmittelautomaten sind eine Form von Warenübergabesystemen. Dadurch wird die Anzahl der Zustellversuche reduziert, andererseits belegen stationäre Systeme urbane Flächen. Neben stationären Systemen werden auch mobile Systeme untersucht [31, 150, 430].
Nachtlogistik	Die Nachtbelieferung ist vor allem für den Einzelhandel interessant: Ein Elektrofahrzeug liefert die Waren leise in der Nacht oder in Randzeiten an, wobei auch die Entladung der Ware geräuscharm durchgeführt werden muss. Dadurch können Verkehre in die Nacht entzerrt werden. Die logistischen Prozesse müssen entsprechend angepasst werden, vor allem wenn die Anwesenheit von Empfängern erforderlich ist [135, 384, 430].

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Tabelle D.2: Nachfragemengen in der Citylogistik je Tag; 6 Werktage je Woche			
Kundenkategorie	Beispiele	Pakete	Paletten
Dienstleistung	Versicherung, Friseur	0,57	0,02
Discounter ⁵²		-	8,70
Drogeriebedarf	Drogeriemarkt	0,50	7,5
Fachgeschäft ⁵³	Spielzeugladen, Buchhandel	3,00	0,72
Gastronomie	Café, Restaurant	0,84	2,38
Gesundheit ⁵³	Optiker, Apotheke, Arzt	5,50	0,11
Handwerk (Lebensmittel)	Bäckerei, Metzger	1,67	2,98
Handwerk (Sonstige)	Bildhauer, Schuhmacher	0,99	0,11
Kaufhaus ⁵²	SB-Warenhaus, Kaufhaus	-	38,76
Krankenhaus/ Pflege	Krankenhaus, Pflegeheim	1,11	1,02
Mode ⁵³	Boutique, Modehaus	6,50	0,04
Öffentliche Einrichtung ⁵⁴	Schule, Kita	0,10	-
Sonstiges Gewerbe ⁵⁴	u. a. Tankstelle	0,25	-
Sportgeschäft		2,03	0,03
Supermarkt ⁵²		-	10,15
Unterhaltung ⁵⁴	Casino, Galerie	0,06	-
Unterkunft	Hotel	0,79	0,25
Verbrauchermarkt ⁵²		-	17,53

Quelle: Eigene Zusammenstellung nach [363], ergänzt durch [12, 140, 167]

E Online-Expertenbefragung

Tabelle E.1: Anzahl vollständiger Antworten in der Online-Befragung; in der Befragung wurden verschiedene Fragestellungen adressiert, mit dem Fokus auf die Gewichtung der Nutzenkriterien	
Abschnitt der Online-Befragung	Anzahl der Antworten
Technologieverfügbarkeit	16
Nutzenkriterien	13 begonnen, 10 abgeschlossen
Nutzenkategorien	8
Disruptives Potenzial	10
Persönliche Angaben	10

Quelle: Eigene Zusammenstellung, basierend auf der Auswertung der Online-Befragung

⁵² detailliertere Quelle wird herangezogen: Fallbeispiel Berlin [167]; Betriebe bzw. Filialketten führen die Transporte in der Regel in Eigenregie mit hoch-kapazitiven Fahrzeugen (N2, N3) durch (Abschnitt 3.2.2); 65% Trocken-, 30% Frische-, 5% Tiefkühl-Ware [167], Non-Food Anteile: Discounter 5 %, SB-Warenhaus 40 %, Supermarkt 15 %, Verbrauchermarkt 30 % [167, 431].

⁵³ angepasster Wert nach Vergleich mit [12, 140].

⁵⁴ Ergänzung nach [12].

Tabelle E.2: Expertise der befragten Personen

Die Befragten wurden in der Online-Befragung ausdrücklich darauf hingewiesen, nur Angaben zu machen, die in dieser Arbeit sowie diese Arbeit begleitende wissenschaftliche Publikationen veröffentlicht werden dürfen; leere Felder zeigen „keine Antwort“ an

Befragte/r	Branche	Arbeitgeber	Branchenzugehörigkeit	Berufserfahrung [Jahre]	Aktueller Beruf	Bildungsgrad
D	ÖPNV	Bahnen der Stadt Monheim GmbH	Personentransport	12	Leiter Geschäftsfeld- und Produktentwicklung	Magister Artium
F	Automobilbau	Mercedes-Benz AG	Personentransport	12	Ingenieur	Diplom
G	Handel	Handelsverband BW	Gütertransport	20	Geschäftsführer	Magister Artium
I	ÖPNV	Verkehrsbetriebe Karlsruhe	Personentransport	15	Diplom-Kaufmann	Dipl.-Kfm.
L	Automobilbau	Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG	Personentransport	15	Projektleiter Mobilitätskonzepte	MBA
M	Transport und Logistik	Dachser	Gütertransport	8	Leitung Kundenservice	Bachelor
O	Transport und Logistik	DPD Deutschland GmbH	Gütertransport	25	Group Manager Citylogistik und Sustainability	
Q	ÖPNV		Personentransport	35	Verkehringenieur	Dipl.-Ing.
R	Stadtplanung	Hochschule für Technik		20	Architekt/ Stadtplaner	Diplom
S	Intralogistik (Warehouse Automation)	Swisslog	Gütertransport	22	Head of Innovation	Wirtschaftsingenieur
A, C, E, H, N, T	-	-	-	-	-	-

Quelle: Eigene Zusammenstellung, basierend auf Antworten aus der Online-Befragung

Tabelle E.3: Kritische Technologiepfade aus der Online-Umfrage

Die Befragten antworten mit ja (j), wenn die entsprechende (technologische) Entwicklung auf dem kritischen Pfad liegt, d. h., wenn sich die Einführung der neuartigen Fahrzeugkonzepte potenziell verzögert, anderenfalls mit nein (n); die Anzahl der positiven (#ja) und negativen Antworten (#nein) ist in den letzten beiden Spalten dargestellt; neben vorgegebenen Antwortmöglichkeiten ergänzten einige Befragte weitere (technologische) Entwicklungen; leere Felder zeigen „keine Antwort“ an

(Technologische) Entwicklung	A	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N	O	Q	R	S	T	#ja	#nein
<i>Vorgegebene Auswahl</i>																		
Elektrifizierung	n	n	n	n		j	n	n	j	n	n	n	n	n	n	j	3	12
Fahrerloses Fahren	n	j	j	j		n	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	13	2
Induktives Laden			n	n		j	n	n	n	j		j	n	n	n		3	8
On-the-road Modularisierung	j	n	n	j		n	j	j	j	n		n	n	n	j		6	7
Vernetzung	n	n	j	n		j	j	n	j	n	j	n	n	j	j	j	8	7
<i>Ergänzungen der Befragten</i>																		
Batterietechnologie	j				j					j							3	0
Elektrische Anschlüsse an Immobilien	j																1	0
Freihaltung von Ladezonen und Abstellflächen													j				1	0
Internalisierung der Wertschöpfungskette									j								1	0
Rechtsentwicklung und Gesetzgebung				j				j				j					3	0
Sicherheitsaspekte bei Abrechnungssystemen						j											1	0
Standardisierung								j	j								2	0
Vorbeugung vor Vandalismus						j											1	0
Vorhandene urbane Infrastruktur															j		1	0

Quelle: Eigene Zusammenstellung, basierend auf Antworten aus der Online-Befragung

Tabelle E.4: Rangfolge der kritischen Technologiepfade aus der Online-Befragung

Je niedriger die Zahl ist, die die Befragten für die jeweilige (technologische) Entwicklung angegeben haben, desto stärker verzögert diese die Einführung neuartiger Fahrzeugkonzepte, d. h. desto weiter liegt deren Erfüllung in der Zukunft; neben vorgegebenen Antwortmöglichkeiten ergänzten einige Befragte weitere (technologische) Entwicklungen; leere Felder zeigen „keine Antwort“ an

(Technologische) Entwicklung	A	C	D	E	F	G	H	I	L	M	N	O	Q	R	S	T	Mittelwert	Stichprobengröße
<i>Vorgegebene Auswahl</i>																		
Elektrifizierung	8	8	5	5	6	7	7	10	8	9	9	5	3	7	8	11	7,25	16
Fahrerloses Fahren	3	2	1	2	1	5	2	1	3	1	5	1		3	1	11	2,80	15
Induktives Laden	4	11	4	3	4	4	5	8	9	4		2		3	6		5,15	13
On-the-road Modularisierung	1	6	3	4	3	7	5	5	7	10		4	1	4	4		4,57	14
Vernetzung	9	6	2	3	7	5	7	3	10	8	3	3	2	3	3	7	5,06	16
<i>Ergänzungen der Befragten</i>																		
Batterietechnologie	5				6					5							5,33	3
Elektroanschlüsse an Immobilien	4																4,00	1
Freihalten von Lade- & Abstellflächen													1				1,00	1
Internalisierung der Wertschöpfungskette																		0
Rechtsentwicklung und Gesetzgebung								4									4,00	1
Sicherheitsaspekte bei Abrechnungssystemen						6											6,00	1
Standardisierung								9	5								7,00	2
Vorbeugung vor Vandalismus																		0
Vorhandene Infrastruktur															7		7,00	1

Quelle: Eigene Zusammenstellung, basierend auf Antworten aus der Online-Befragung

Tabelle E.5: *Kriteriengewichtungen aus der Online-Befragung*

Zuordnung der Kriterien-ID zu Kriterienbezeichnungen in Tabelle F.1; Buchstaben als Pseudonyme der Befragten (Tabelle E.2); leere Felder zeigen „keine Antwort“ an

Kriterien-ID	A	D	E	F	G	I	L	M	O	Q	R	S	T	Mittelwert	Stichproben- größe
N01	1	3	3	2	4	4	0	3	2	1	3	1	3	2,31	13
N02	4	2	3	2	4	4	4	4	3	4	3	2	4	3,31	13
N03	3	3	2	4	3	4	2	2	3	4	2	2	4	2,92	13
N04		3	3	1	4	4	4	3	4	4	3	3	3	3,25	12
N05	4	4	4	4	4	4	2	4	4	4	3	4	3	3,69	13
N06	4	3	3	4	4	4	4	4	4	2	4	3	3	3,54	13
N07	4	2	3	4	1	4	3	4	3	3		3		3,09	11
N08	3	3	3	1	3	4	3	0	3	3		3		2,64	11
N09	1	3	2	1	1	2	1	0	3	1		1	2	1,50	12
N10	1	3	2	2	1	3	2	0	3	3		0	2	1,83	12
N11	2	2	2	2	4	2	1	4	4	4	2	3		2,67	12
N12	2	3	2	2	4	2	2	3	2	2	3	2	3	2,46	13
N13	4	4		3	2	4	4	3	3	4	3	3		3,36	11
N14	4	4		2	4	4	3	4	4	3	3	4		3,55	11
N15	1	2		3	3	2	2	3	4	4	2	3		2,64	11
N16	3	1		1	1	2	1	4	0	3	3	1		1,82	11
N17	0	1		2	1	2	0	2	1	3	2	1		1,36	11
N18	1	3		1	2	4	1	1	2	3	2	2		2,00	11
N19	2	2		1	1	2	0	2	2	4	2	1		1,73	11
N20	4	3		3	3	4	4	4	4	4	3	3		3,55	11
N21	4	4		3	4	4	3	3	4	4	3	3		3,55	11
N22	1	1		4	4	3	3	4	3	3	3	2		2,82	11
N23	3	3		2	3	4	2	3	3	4	4	3		3,09	11
N24	3	2		3	4	3	3	4	4	3	3	1		3,00	11
N25	3	3		2	4	3	3	0	4	4	3	0		2,64	11
N26	3	0		2	3	3	4	2	1	2	4	2		2,36	11
N27	3	0		4	3	4	4	2	1	2	3	2		2,55	11
N28	4	0		3	4	4	4	2	1	3	4	3		2,91	11
N29	4	1		2	1	4	2	3	2	4	3	3		2,64	11
N30	4	4		3	2	4	4	4	4	4	3	2		3,45	11
N31		3		1	1	3	3	2	2	2	3	1		2,10	10
N32	2	4		3	4	4	2	2	2	4	3	4		3,09	11

N33	2	3	3	4	2	4	3	3	4	3		3,10	10
N34	3	3	2	2	4	4	3	3	3	4	4	3,18	11
N35	2	3	3	3	2	3	3	4	4	2	2	2,82	11
N36		1	2	2	2	0	1	2	3	4	0	1,70	10
N37	3	2	3	4	4	3	4	4	4	3	3	3,36	11
N38	3	1	2	1	2	2	1	3	4	3	3	2,27	11
N39	1	2	2	4	4	1	4	1	2	4	3	2,55	11
N40	0	1	2	3	1	1	3	2	1	3	0	1,55	11
N41		2		3	3	3	3	4	4	4	3	3,22	9
N42		1	4	3	3	4	4	4	2	3	4	3,20	10
N43		2	3	2	3	3	4	3	4	2	3	2,90	10
N44		3	3	3	2	1	2	4	4	1	3	2,60	10
N45		1	1	4	3	2	1	2	2	3	4	2,30	10
N46		3	2	3	3	4	1	2	0	4	4	2,60	10
N47		3	4	3	3	4	1	1	1	4	3	2,70	10
N48		2	3	1	1	1	1	1	1	2	0	1,30	10
N49		3	3	3	2	4	4	4	4	2	1	3,00	10
N50		4	3	2	4	3	3	4	4	1	2	3,00	10
N51		2	2	3	3	1	3	4	4	2	1	2,50	10

Quelle: Eigene Zusammenstellung, basierend auf Antworten aus der Online-Befragung

Tabelle E.6: Gewichtungen der Nutzenkategorien aus der Online-Befragung

Die Gewichtungen je Befragte/r berechnen sich entsprechend des analytischen Hierarchieprozesses (AHP; Kapitel 4.2.4) aus den Paarvergleichen, welche die Befragten durchgeführt haben und von 8 beantwortet wurden; Buchstaben als Pseudonyme der Befragten (Tabelle E.2)

Kategorie	D	F	I	M	O	Q	R	S	Mittelwert
Betrieb	0,057	0,161	0,055	0,158	0,232	0,240	0,099	0,120	0,140
Fahrzeug	0,242	0,140	0,076	0,106	0,172	0,076	0,068	0,078	0,120
Strategie	0,399	0,204	0,072	0,054	0,054	0,086	0,258	0,319	0,181
Umwelt & Umfeld	0,084	0,083	0,430	0,341	0,137	0,122	0,290	0,319	0,226
Verkehr	0,068	0,057	0,203	0,078	0,079	0,226	0,180	0,120	0,126
Wirtschaftlichkeit	0,151	0,353	0,165	0,262	0,326	0,251	0,105	0,043	0,207
Konsistenzfaktor	0,093	0,079	0,086	0,128	0,076	0,137	0,091	0,069	

Quelle: Eigene Zusammenstellung, basierend auf Antworten aus der Online-Befragung

F Bewertungsgrundlage der erweiterten Nutzenanalyse

Tabelle F.1: Nutzenkriterien, geordnet nach Nutzenkategorien (FK: Fahrzeugkonzept, WS: Anwender-Workshop)			
ID	Kriterium	Erfüllungsfrage & Erklärung	Quellen
Betrieb			
N01	Flexibilität bezüglich Menge & Art (G)	Kann das FK verschiedene Güterarten transportieren und seine Kapazität hinsichtlich der aktuellen Liefermenge bedarfsorientiert anpassen? z. B. Paketdienst sowie Stückgut-Belieferung; verschieden große Transporteinheiten	[23], [24], WS [432]
N02	Flexibilität der Haltepunkte (P)	Kann das FK einen barrierefreien Zugang an verschiedenen Haltepunkten ermöglichen? Verschiedene Haltestellen haben z. B. verschiedene Einstiegshöhen: übliche Busborde des ÖPNV (z. B. Kasseler Bord) sowie andere Einstiegshöhen oder ebenerdiger Zugang	[433], [24]
N03	Funktionale Autarkie (G & P)	Kann das FK Grundanforderungen sowohl während der Fahrt als auch im Stillstand ohne externe Abhängigkeiten stets gewährleisten? Grundanforderungen (wie z. B. Klimatisierung) müssen immer gewährleistet werden können, sofern sich Güter oder Personen in der Transporteinheit befinden, unabhängig von den anderen Flotteneinheiten; z. B. muss die Klimatisierung von verderblichen Lebensmitteln etc. sowohl während der Fahrt als auch im Stillstand gewährleistet sein	[433]
N04	Infrastrukturanpassung (G)	Muss die Infrastruktur für den Betrieb des FK angepasst werden? z. B. Veränderung der Höhe von Laderampen	[433], WS [432]
N05	Kompatibilität mit Standard-Ladehilfsmittel (G)	Ist das FK mit Standard-Ladehilfsmittel kompatibel? Europalette oder Gitterrollwagen	WS [432]
N06	Kompatibilität mit Standard-Transporteinheiten (G)	Ist das FK mit Standard- Transporteinheiten kompatibel? z. B. ISO-Container oder Wechselbrücke	WS [432], [24]
N07	Ladefläche (G)	Ist eine ebene Ladefläche bei dem FK möglich? eine durchgängige Ladefläche möglichst ohne Erhebungen oder Einschränkungen	WS [432]

N08	Pick-up Entfernung (G)	Wie werden die Waren an die Kunden übergeben und welchen Weg müssen die Kunden dabei zurücklegen? Fahrzeugkonzeptinhärente (d. h. im „Standard“ Lieferprozess des FK) Pick-up Entfernung, die Kunden zurücklegen müssen, um die Ware zu erhalten. Z. B. ist die Entfernung bei Haustürzustellungen minimal.	[23], [38]
N09	Sitzhöhe (P)	Bedingt das FK Herausforderungen bzw. Einschränkungen bezüglich der Sitzhöhe der Fahrgäste?	WS [432]
N10	Sitzposition (P)	Bedingt das FK Herausforderungen bzw. Einschränkungen bezüglich der Sitzposition der Fahrgäste? z. B. seitlich, in bzw. entgegen der Fahrtrichtung	WS [432]
N11	Standortflexibilität (G)	Können Waren standort- und infrastrukturunabhängig entladen werden? Einflussfaktoren sind dabei unter anderem von welchen Seiten die Transporteinheit zugänglich ist (z. B. von hinten, aber auch von links oder rechts), ob der Entladevorgang zusätzliche Hilfsmittel (z. B. Laderampe, Hubstapler etc.) benötigt, ob der Zugang im geso wie entkoppelten Betrieb möglich ist und ob die Ladehöhe des FK verändert werden kann	[23], [24], [433], WS [432]
N12	Zeitlich flexibler Zugang (G)	Sind Waren möglichst 24/7 bzw. nach individuellem Bedarf in der Transporteinheit zugänglich? Dabei geht es um FK-inhärente Möglichkeiten unter sinnvollen Einsatzkonzepten, nicht um Personal oder organisatorische Maßnahmen.	[23], [38], [24]
Fahrzeug			
N13	Automatisierungskonzeption	Bedingt das FK Herausforderungen bzw. Einschränkungen bezüglich der Automatisierung? z. B. Sichtfelder der Sensorik, Automatisierung des Ladekonzepts	[434], [11], [433]
N14	Crash-Sicherheit	Bedingt das FK Herausforderungen bzw. Einschränkungen bezüglich der Crash-Sicherheit? Teil der Sicherheit (Safety) bei RAMS (reliability, availability, maintainability and safety; in Anlehnung an DIN EN 50126); z. B. bei der Karosseriestruktur	[24], [435]
N15	Energieverbrauch	Inwieweit verändert sich der Energieverbrauch FK-bedingt? z. B. Nebenverbraucher für Automatisierungsfunktionen oder den Hubvorgang, aber auch z. B. konzeptbedingtes Mehrgewicht des FK	[25], [24], [26]
N16	Fahrzeugkennzahlen	Wie hoch sind die Leistungskennzahlen des FK? Fahrzeugkennzahlen wie z. B. Beschleunigung, Höchstgeschwindigkeit, max. Drehmoment etc.	[208], [434], [433], [6]

N17	Fahrwiderstand	Bedingt das FK Herausforderungen bzw. Einschränkungen bezüglich des Fahrwiderstands? Fahrwiderstand als Summe aus Luft-, Roll-, Steigungs- und Beschleunigungswiderstand; z. B. konzeptbedingt große Stirnfläche	[435], [433]
N18	Geländeabhängigkeit	Ist dem FK eine hohe Abhängigkeit von der Fahrbahn/ Umgebung inhärent? Die Abhängigkeit korreliert reziprok unter anderem mit hoher Bodenfreiheit, kurzem Radstand, großem Rampenwinkel, hohem Böschungswinkel, kurzem Überhang.	[433]
N19	Gewichtsverteilung	Bedingt das FK Herausforderungen bzw. Einschränkungen bezüglich der Gewichtsverteilung? Insbesondere die Schwerpunktlage mit oder ohne Zuladung	[435], [433]
N20	Instandhaltung und Zuverlässigkeit	Bedingt das FK Herausforderungen bzw. Einschränkungen bezüglich der Instandhaltung und Zuverlässigkeit? Teil der RAMS (reliability, availability, maintainability and safety; in Anlehnung an DIN EN 50126); z. B. durch besonders viele bewegliche und wartungsintensive Bauteile oder neue Komponenten für Automatisierung und Hub	[208], [434], [436], [191], [437]
N21	IT-Sicherheit	Bedingt das FK Herausforderungen bzw. Einschränkungen bezüglich der IT-Sicherheit? Teil der Sicherheit (Security) bei RAMS (reliability, availability, maintainability and safety; in Anlehnung an DIN EN 50126); z. B. könnten potenziell mehr Sicherheitsrisiken entstehen, je stärker das Fahrzeug vernetzt ist bzw. je mehr Akteure Teil der Vernetzung sind	[24]
N22	Ladezeit	Wie lange dauert ein Ladezyklus des Fahrzeugs? Teil der Verfügbarkeit bei RAMS (reliability, availability, maintainability, and safety; in Anlehnung an DIN EN 50126); z. B. konzeptbedingte lange Ladedauern	[438], [433]
N23	Passive Unfallsicherheit	Bedingt das FK Herausforderungen bzw. Einschränkungen bezüglich der passiven Unfallsicherheit? Teil der Sicherheit (Safety) bei RAMS (reliability, availability, maintainability and safety; in Anlehnung an DIN EN 50126); z. B., dass Körperteile eingeklemmt werden	[433]
N24	Reichweite	Wie hoch ist die Reichweite des Fahrzeugs? Teil der Verfügbarkeit bei RAMS (reliability, availability, maintainability and safety; in Anlehnung an DIN EN 50126); gegebenenfalls kann die Reichweite durch neue technische oder organisatorische Konzepte verlängert werden	[438], [435], [433], [191]

N25	Schutz vor Vandalismus	Bedingt das FK Herausforderungen bzw. Einschränkungen bezüglich des Schutzes vor vorsätzlicher physischer Beschädigung der Fahr- oder Transporteinheit? Teil der Sicherheit (Security) bei RAMS (reliability, availability, maintainability and safety; in Anlehnung an DIN EN 50126)	[433], [38]
N26	Umrüstdauer	Wie lange dauert der Wechsel von einer Transporteinheit auf eine andere? Sieht das FK keinen Wechsel vor, ist die Umrüstdauer null.	[32], [433]
N27	Umrüstdependenz	Wie sehr ist das Fahrzeug konzeptbedingt von Infrastruktur, Personen oder anderen Hilfsmitteln beim Wechsel von einer Transporteinheit auf eine andere abhängig? Sieht das FK keinen Wechsel vor, liegt keine Umrüstdependenz vor.	WS [432], [433]
N28	Umrüstkomplexität	Wie komplex ist der Wechsel von einer Transporteinheit auf eine andere bei dem FK? Komplexität liegt z. B. in den benötigten Hilfsmitteln, der Verteilung der technischen Komponenten und der Bereitstellung der benötigten Energie.	WS [432], [433]
N29	Wendigkeit	Ist das FK besonders wendig? Wendigkeit bedeutet auf kleinem Raum zu wenden aber auch gegebenenfalls die Transporteinheiten zu wechseln: abhängig von unter anderem Radeinschlag, Radstand; alternativ Wendekreis bzw. Rangierfläche.	[433], [24]
Strategie			
N30	Automatisierungsgrad	In welchem Automatisierungslevel wird das FK betrieben?	[434], [11]
N31	Innovativität	Wie innovationsfördernd ist das FK? Auswirkung auf die Innovationslandschaft, d. h. der Grad zu dem das Konzept Innovationen für dieses Fahrzeugkonzept, aber auch für die gesamte Branche begünstigt (z. B. durch offene Plattformgedanken)	[436]
N32	Technologieadaption	Ermöglicht es das FK Teile bzw. Subsysteme frühzeitig durch technisch verbesserte Komponenten zu ersetzen, ohne das gesamte Fahrzeug recyceln zu müssen? Dadurch können veraltete oder ineffiziente Technologien frühzeitig ersetzt werden.	[437]
N33	Technologieverfügbarkeit	Wann ist das FK voraussichtlich einsatzreif, sodass es im Regelbetrieb operieren kann? z. B. die zeitliche Entwicklung von Funktionen der Automatisierung oder auch die Verfügbarkeit benötigter Ladeinfrastruktur; technisch-organisatorischer, nicht politischer Fokus	[433], [436]

Umwelt & Umfeld			
N34	Akzeptanz	Gibt es FK-inhärente Eigenschaften, durch die das Fahrzeug besonders vom Umfeld akzeptiert wird? z. B., dass sich das FK möglichst in das Stadtbild integriert (z. B. kein "2. Reihe Parken"), das Umfeld nicht beeinträchtigt wird (z. B. keine Konflikte mit Fuß- und Radverkehr bei Be- und Entladevorgängen) oder neue Funktionen bzw. Dienstleistungen ermöglicht werden, die sich das Umfeld wünscht (z. B. ein vielfältigeres Angebot regionaler Märkte)	[433], [24], [6], [25]
N35	Arbeitsbedingungen	Leistet das FK einen Beitrag zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen der Stakeholder im urbanen Wirtschaftsverkehr? z. B. Verbesserung der Lenk- und Ruhezeiten, sowie den Arbeitszeiten der beteiligten Stakeholder (Kunden, Lagerarbeiter etc.); zu beachten ist, ob sich die Bedingungen nur in einem oder mehreren Bereichen bzw. Einsatzzwecken des FK verbessern	[433], [25]
N36	Gebäudeintegration	Kann das FK ganz oder in Teilen in Gebäude integriert werden, um weniger Fläche zu verbrauchen? Möglichkeit des FK das Fahrzeug bzw. die Transporteinheit in ein Gebäude zu integrieren, z. B. als temporäre Lagerfläche oder für das Retourenmanagement.	WS [432]
N37	Ökobilanz	Inwieweit verändern sich die systemische Ökobilanz durch Einführung des FK? Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse (cradle to grave) inklusive Analyse der Schadstoffemissionen	[208], [24], [25], [6], [130], [140], [26]
N38	Platzbedarf	Wie effizient ist der Platzbedarf des FK? Dabei werden die verschiedenen Zustände des FK (Fahrbetrieb, Stillstand, im Einsatz, nicht im Betrieb) berücksichtigt und die Effizienz in Relation zur Transportkapazität bewertet.	[25], [24], [433], [166]
N39	Silent Night Delivery	Erlaubt das FK eine leise Nachtbelieferung? Möglichkeit des FK zu akustisch emissionsarmer Belieferung in der Nacht inklusive vorangehender oder folgender Prozessschritte die ebenfalls in der Nacht stattfinden.	[24], [435], [25], [6], [130], [140], [26]

N40	Stapelfähigkeit	Kann das FK ganz oder in Teilen auf andere Fahrzeuge bzw. Transporteinheiten gestapelt werden? Möglichkeit des FK Fahr- und bzw. oder Transporteinheiten zu stapeln und so im Stillstand Fläche einzusparen. Kritische Merkmale sind dabei z. B. die Karosseriesteifigkeit und Aufnahmeschnittstellen.	[433]
Verkehr			
N41	Anzahl der Umschläge	Bedingt das FK eine Veränderung der Anzahl der Umschläge im Lieferkonzept? in typischen Lieferkonzepten	[166], [24], [5]
N42	Auslastung	Wie hoch ist der durchschnittliche, konzeptinhärente Besetzungs- bzw. Auslastungsgrad des FK?	[23], [6], [439], [24], WS [432]
N43	Flottenfahrleistung	Wie verändert sich die Flottenfahrleistung, wenn das FK eingeführt wird?	[433], [6], [140], [439], [440], [26]
N44	Flottengröße	Wie verändert sich die Anzahl der Fahr- bzw. Transporteinheiten der Flotte, wenn das FK eingeführt wird?	[6], [439], [440], [166]
N45	Intermodalität	Ist das FK geeignet, verschiedene Verkehrsträger durch entsprechende Schnittstellen zu adressieren? Verkehrsträger sind Schiene, Straße, Wasser und Luft	[433], [24], [25]
N46	Verkehrsentzerrung	Kann das FK zur Reduzierung der Verkehrsbelastung beitragen? Fahrzeugkonzeptbedingte Verminderung der Straßenauslastung, z. B. durch Entzerrung des Verkehrs in Randzeiten.	[6], [130], [24], [439], [26], WS [432]
Wirtschaftlichkeit			
N47	Einsatzbereiche	Kann das FK in verschiedenen, unterschiedlichen Bereichen bzw. Anwendungen bzw. Branchen eingesetzt werden?	[433], [23], [24], WS [432]
N48	Ergänzende Services	Ermöglicht das FK ergänzende Services, d. h. Einnahmequellen, zur Primäraufgabe? Die Primäraufgabe (in der Regel Personen- und bzw. oder Gütertransport) ergänzende Funktionalitäten und Höhe des zu erwartenden Zusatznutzens (z. B. durch Smart Grid Anbindung, Werbeflächen etc.).	[24], [433]

N49	Lebenszykluskosten	Inwieweit verändern sich die Fahrzeuglebenszykluskosten durch das FK? Summe der Investitions- und Betriebskosten während der Fahrzeuglebensdauer; kann z. B. mit dem Relevant Cost of Ownership (RCO) Ansatz berechnet werden	[208], [434], [433], [130], [24], [38], [436], WS [432]
N50	Personal	Ist bei Einführung des FK eine Änderung des benötigten Personals zu erwarten? FK-bedingte Notwendigkeit für Personal in verschiedenen Bereichen: z. B. Fahrfunktion, Lager, Teleoperation, Zustellung etc.	[433]
N51	Primärerlös	Welchen Einfluss hat das FK auf die Höhe der Erlöse aus der primären Transportaufgabe? Erlös aus der Primäraufgabe (in der Regel Personen- und bzw. oder Gütertransport).	[433]

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Tabelle F.2: Begründungen für die Paarvergleiche im AHP (analytischen Hierarchieprozess) des erweiterten Nutzenmodells

Zusammenfassende Begründung für alle Paarvergleiche eines Nutzenkriteriums; Zuordnung der Kriterien-ID zu Kriterienbezeichnungen in Tabelle F.1; Akronyme der Fahrzeugkonzepte werden entsprechend Kapitel 2 verwendet (otri-ci: Van ; otri-ci*: RoboVan , otri-fm: Flex ; otri-im: Mover ; otm-ibm: iMod ; otm-sam: U-Shift ); Abkürzungen: on-the-road integral (otri); on-the-road modular (otrm); conventional integral (ci); flexible mover (fm); integral mover (im); infrastructure-based modular (ibm); standalone modular (sam); Gütertransport (G); Personentransport (P); Fahrzeugkonzept (FK)

ID	Begründung
N01	ci und ci* unterscheiden sich vor allem hinsichtlich des Automatisierungsgrads. fm kann verschiedene Einheiten koppeln und dadurch die Kapazität des Platoons verändern bzw. verschiedene Güterarten transportieren. im ist nach Verlassen der Produktion an einen Einsatzzweck vorwiegend gebunden und kann ebenso wie ci und ci* weder verschiedene Güterarten aufnehmen, noch die Kapazität ändern. Durch otm FK (sam und ibm) können verschiedene Transporteinheiten in verschiedener Größe und für verschiedene Einsatzzwecke von den Fahreinheiten aufgenommen werden. Damit sind otm bei diesem Kriterium auch flexibler als otri-fm.
N02	fm, im, ibm und sam haben konzeptionell bereits eine niedrigere Einstiegshöhe als ci und ci*, welche wiederum ebenso wie bei allen FK variiert werden kann. Deshalb ist der Höhenunterschied bei ci und ci* weniger geeignet als bei den anderen FK. ibm verhalten sich hinsichtlich dieses Kriteriums nach Kopplung der Transport- und Fahreinheit ähnlich wie im. fm ist durch Abkopplung der Einheiten flexibel an verschiedene Orte verteilbar, ohne dass das gesamte (große) FK die einzelnen Orte als Ganzes anfahren muss. Konzeptbedingt ermöglichen sam FK einen tatsächlich ebenerdigen Zugang ebenso wie den Zugang bei Standard-Busbordhöhen. Damit können sam FK auch barrierefreie flexible Haltestellen, die keinen Busbord haben, bedienen. Dies ist wichtig für flexible On-Demand ÖV Angebote.

- N03 Integrale FK (ci, ci*, fm und im) sind in sich geschlossene integrale Einheiten, die jede für sich alle relevanten Funktionen besitzt (autark). Durch die Trennung von Transporteinheit und Fahreinheit bei otram FK (sam und ibm) muss zusätzlich sichergestellt werden, dass die Transporteinheiten auch ohne Fahreinheiten durchgängig funktionieren. Vor allem bei sam FK ist dies eine Herausforderung, da die Transporteinheit überall abgestellt werden kann. Bei ibm ist beim Wechsel der Transporteinheiten Infrastruktur notwendig, die freistehende Transporteinheiten gegebenenfalls mit Energie versorgen kann.
- N04 Vollautomatisierte FK benötigen im Vergleich zu ci (SQ) andere Ladeinfrastruktur, die keiner menschlichen Unterstützung bedarf (z. B. induktives Laden). Diese Infrastruktur muss erst noch aufgebaut werden. Neuartige Moverkonzepte (fm, im, ibm und sam) sind im Gegensatz zu ci und ci* mit einigen Laderampenstandards zum Entladen von Waren inkompatibel. ibm FK benötigen zusätzliche Infrastruktur für das Koppeln der Transporteinheiten und Fahreinheiten, die das andere otram FK sam nicht benötigt.
- N05 im und ibm basieren auf einer Skateboard Architektur, bei der die Transporteinheit von der Seite beladen wird und die Waren über einen Querversatz in der Transporteinheit nach links oder rechts verteilt werden müssen. Für Standard-Ladehilfsmittel (LHM) Gitterrollwägen stellt dies keine Herausforderung dar. Europaletten werden in der Regel mit Flurfördermitteln eingeladen; dabei stellt der Querversatz eine Herausforderung dar. fm bedingen durch ein rückwärtiges Zugangskonzept ebenfalls einen geringeren Querversatz. sam, ci und ci* sind gleichermaßen kompatibel mit Standard LHM.
- N06 otram FK (sam und ibm) können Module aufnehmen, die eine Kompatibilität mit Standard Transporteinheiten wie Wechselbrücken ermöglichen. ci und ci* sind im Gegensatz zu fm und im ebenfalls je nach spezifischer Ausführung kompatibel mit ausgewählten Transporteinheiten.
- N07 sam, ci, ci* und fm haben konzeptionell eine ebene Ladefläche, die allerdings durch Fahrwerkskomponenten eingeschränkt sein kann (z. B. Radkästen). im und vor allem ibm beruhen auf einer Skateboard Architektur, die signifikante Einschränkungen bedingt.
- N08 bei ci FK liefert typischerweise das Fahrpersonal die Waren bis an die Haustür. Bei den anderen FK erfolgt vorzugsweise ein Pick-up der Kunden aus den FK (Straßenzustellung). Zusätzlich werden die Transporteinheiten bei ibm und sam als zentral gelegene Warenübergabestellen genutzt, wodurch sich die Pick-up Entfernung erhöht.
- N09 Durch die Architektur der sam FK, müssen Sitzplätze konzeptionell für eine effiziente Flächennutzung über den Radkästen statt zwischen den Rädern platziert werden. Gleiches gilt bei ibm für die Kopfen. Die übrigen FK haben weniger Einschränkungen diesbezüglich.
- N10 siehe Begründung zu N09 sowie: Damit sind die Sitzplätze bei sam in der Regel seitlich zur Fahrtrichtung angeordnet und bei ibm ein Teil der Sitzplätze entgegen der Fahrtrichtung. Die übrigen FK haben weniger Einschränkungen diesbezüglich. Bis auf ci haben die FK aber nicht mehr unbedingt eine Vorzugsrichtung, wodurch Sitzplätze nicht mehr eindeutig daran ausgerichtet werden müssen.
- N11 ci und ci* FK ermöglichen den Zugang von der Rückseite, zum Teil von der Seite und an Laderampen; ebenerdig aber nur mit Ladebordwänden. fm, im und ibm FK sind in der Regel von der Seite zugänglich und können weder ebenerdig beladen werden noch sind sie mit Laderampen kompatibel. sam FK sind ebenerdig zugänglich, in der Regel von der Rückseite und zum Teil von der Seite zugänglich; abgestellt, d. h. freistehend, sind sie von allen Seiten zugänglich. sam FK benötigen allerdings Platz, wenn die Transporteinheiten abgestellt werden und sind nicht mit der Status quo-Laderampenhöhe kompatibel. Vor allem der ebenerdige und flexible Zugang verbessern die Standortflexibilität von sam gegenüber ci und ci*

- N12 sam FK stellen Transporteinheiten unter sinnvollen Einsatzkonzepten flexibel in dem Quartier ab; die Transporteinheiten sind wiederum 24/7 zugänglich. Bei ci/ SQ ist dies nicht möglich, da Fahrzeug und Fahrer in der Regel vereint bleiben; ci* und im ermöglichen dies hingegen. Allerdings steht dabei das gesamte Fahrzeug die ganze Zeit still, wenn Waren 24/7 an einem Ort zugänglich sein sollen. fm können Einheiten trennen bzw. abkoppeln. Damit steht zumindest nur ein Teil der Fahreinheit an einem Ort still. bei ibm können Transporteinheiten theoretisch ebenfalls abgestellt werden und sind dann 24/7 ohne Fahreinheit zugänglich. Allerdings ist dies nur an Orten möglich, die mit entsprechender Infrastruktur für einen Wechsel von Transporteinheiten ausgestattet sind.
- N13 Die Fahreinheiten von sam und ibm haben im Vergleich zu den integralen FK ci*, im und fm eine geringere Höhe. Sensorik für die Automatisierung benötigt aber eine bestimmte Höhe für ein ausreichend großes Sichtfeld. sam stehen zusätzlich vor der Herausforderung, dass bei überstehenden Transporteinheiten die Sensorik an der Fahreinheit einen blinden Fleck hinter der Transporteinheit hat (Anhang G). Daher werden für überstehende Transporteinheiten zusätzliche Lösungen benötigt (z. B. zusätzliche Sensorik in der Transporteinheit). ci (SQ) ist nicht fahrerlos, hat aber Assistenzsysteme, die ebenfalls Sensorik bedürfen; ci wird für dieses Kriterium ci* gleichgesetzt.
- N14 Im Gegensatz zu dem (fahrerlosen) Status quo (ci und ci*) sind die anderen Fahrzeugklassen nicht auf eine Hauptfahrtrichtung beschränkt. Langjährige fahrzeugtechnische Entwicklung hat die Crash-Sicherheit der Status quo-Fahrzeuge optimiert. Bei sam, ibm, im und fm Fahrzeugkonzepten ergeben sich dagegen neue Herausforderungen beim Insassenschutz, da das Innenraum-/ Sicherheitskonzept nicht auf eine Vorzugsrichtung ausgerichtet werden kann und Passagiere anders angeordnet sein können als im Status quo. Die einzelnen Module der fm Fahrzeugkonzepte verhalten sich wie Fahrzeuge der im Fahrzeugklasse; bei einem Unfall mit aktiver physischer Kopplung besteht jedoch eine erhöhte Unfallgefahr für Module der fm Fahrzeugklasse. Modulare Fahrzeugkonzepte (sam und ibm) sind nicht integral aufgebaut und besitzen durch die Schnittstelle zwischen Fahr- und Transporteinheit eine konzeptbedingte Herausforderung, die beim Insassenschutz besonders berücksichtigt werden muss.
- N15 Für Automatisierungsfunktionen wird zum einen mehr Energie benötigt, zum anderen sind aber auch Einsparungen durch optimiertes Fahrverhalten möglich. Bei otram FK (sam, ibm) wird zusätzliche Energie für den Hubvorgang benötigt. Zudem haben sie konzeptbedingt durch die Modularität eine höhere Masse. fm könnten durch Platooning gegebenenfalls Energie einsparen. Dies wirkt sich aber vor allem für Fahrten bei höherer Geschwindigkeit aus. Daher werden alle FK bis auf sam und ibm gleich bewertet.
- N16 Alle FK entsprechen den Anforderungen im urbanen Raum und werden daher gleich bewertet.
- N17 Neuartige FK (fm, im, sam, ibm) fokussieren aufgrund des urbanen Einsatzes weniger auf Aerodynamik und Fahrwiderstände. Der Status quo (ci) und ci* wurden historisch hinsichtlich dieses Kriteriums bereits optimiert.
- N18 Der Status quo (ci) wurde bereits erfolgreich in verschiedenen Umgebungen eingesetzt. ci* nutzt dieselbe Architektur wie ci. im und ibm haben eine geringere Bodenfreiheit. Darüber hinaus stellt der konzeptionelle Überhang einiger Transporteinheiten bei sam eine weitere Herausforderung dar. fm ermöglichen physische Übergänge im Platoon, wodurch sich die Flexibilität des Konzepts im Platoon hinsichtlich der Umgebungsbedingungen einschränkt.

- N19 sam FK müssen die Masse der Transporteinheit im Kopf der Fahreinheit kompensieren. Dies stellt eine Herausforderung der Schwerpunktlage dar, nicht nur beim Transport einer Transporteinheit, sondern vor allem auch wenn die Fahreinheit ohne Transporteinheit als Gegengewicht fährt. Dies ist ein signifikanter Unterschied zu den anderen FK.
- N20 Bis auf ci (SQ) besitzen alle FK Automatisierungskomponenten, die zusätzliche Wartung benötigen. Durch die Modularisierung besitzen sam und ibm zusätzliche Teile, die instandgehalten werden müssen; bei ibm zusätzlich die benötigte Infrastruktur. Dagegen bedingt die Modularität auch den Vorteil, dass die separaten Teile unabhängig voneinander gewartet werden können, während die anderen Einheiten weiter im Betrieb sind.
- N21 Die otm FK sam und ibm sowie die otri-fm basieren auf verteilten Einheiten (Module im Platoon bzw. Transporteinheiten und Fahreinheiten) die für einen sinnvollen Betrieb miteinander vernetzt werden. Die verstärkte digitale Vernetzung muss im Vergleich zu ci, ci* und im zusätzlich abgesichert werden. ci hat die wenigsten Automatisierungsfunktionen und damit weniger digitale potenzielle Sicherheitslücken.
- N22 Die FK sam und ibm nutzen verteilte Energiespeicher in den Transporteinheiten, um damit die Fahreinheiten zu laden. Dadurch reduziert sich die Zeit die die Fahreinheiten stationär geladen werden müssen gegenüber den anderen FK.
- N23 Im Unterschied zu den anderen Konzepten koppeln fm, ibm und sam verschiedene Einheiten aneinander. Dabei entstehen potenzielle Gefahrensituationen. Bei ibm FK findet der Prozess unter definierten Rahmenbedingungen und Infrastrukturbeteiligung statt, wodurch die Gefahrensituation im Vergleich zu fm und sam reduziert werden kann. Generell kann Sensorik die Gefahren weitestgehend eliminieren.
- N24 Die FK sam und ibm nutzen verteilte Energiespeicher in den Transporteinheiten, um damit die Fahreinheiten zu laden. Dadurch lässt sich deren Reichweite steigern. Bei sam ist dies noch deutlicher als bei ibm, da generell häufiger Transporteinheiten gewechselt werden und damit häufiger Transporteinheiten mit Batterien zum Energietransfer aufgenommen werden. fm kann über die physische Deichsel ebenfalls Energie zwischen den Einheiten transferieren und damit die systemische Reichweite erhöhen. Allerdings fährt jede Einheit autark und benötigt Energie. ci, ci* und im müssen stationär geladen werden, wodurch deren Reichweite geringer ist.
- N25 Bei sam und ibm werden einzelne Transporteinheiten in dem Einsatzgebiet abgestellt und sind damit potenziell Vandalismus ausgesetzt. Bei ibm FK deutlich weniger, da diese nur an definierten Orten mit Infrastruktur abgestellt werden können, d. h. vornehmlich im Depot und nur in Einzelfällen in der Öffentlichkeit. Grundsätzlich bietet eine Fahrzeugbegleitung (ci) zusätzlichen Schutz.
- N26 Bei ci, ci* und im findet keine Umrüstung statt. Bei fm wird unter Umrüsten das Ankoppeln der einzelnen Module verstanden; dies findet aber nicht im Stillstand wie bei sam und ibm FK, sondern während der Fahrt statt. ibm und sam werden für dieses Kriterium gleich bewertet, da die Dauer technisch bei beiden FK gleichermaßen optimiert werden kann.
- N27 Bei ci, ci* und im findet keine Umrüstung statt. Bei fm wird unter Umrüsten das Ankoppeln der einzelnen Module verstanden; dies findet aber nicht im Stillstand wie bei sam und ibm FK, sondern während der Fahrt statt und ist nicht von anderen Randbedingungen abhängig. Während sam FK nur eine ebene Fläche benötigen, sind ibm FK von der Infrastruktur abhängig die den Wechsel der Transporteinheiten ermöglichen.
- N28 Bei ci, ci* und im findet keine Umrüstung statt. Bei fm wird unter Umrüsten das Ankoppeln der einzelnen Module verstanden; dies findet aber nicht im Stillstand wie bei sam und ibm FK, sondern während der Fahrt statt. Im Vergleich zu sam und fm wird der Wechsel der Transporteinheiten bei ibm bedingt durch die zusätzliche Infrastruktur (z. B. Industrieroboter oder Kran) als komplexer bewertet.

- N29 Die neuartigen Mover-Konzepte (im, fm, sam, ibm) haben meist kurze Radstände und große Radeinschlagwinkel, sodass sie eine hohe Wendigkeit für die urbane Anwendung aufweisen. Aufgrund der Kürze der Module bei fm FK sind diese in sich wendig, als gekoppelter Platoon weisen fm FK dagegen eine sehr geringe Wendigkeit auf. Der mögliche Überhang der Transporteinheit bei sam reduziert deren Wendigkeit signifikant.
- N30 Bis auf ci, welches als Status quo durch Fahrpersonal, unterstützt durch Assistenzsysteme, bedient wird, werden alle anderen FK fahrerlos betrieben.
- N31 Die otram FK (sam und ibm) fördern durch die offene Schnittstellenstrategie die Entwicklung neuer individueller Transporteinheiten aber auch Lösungen für die Fahreinheit. Beim Plattformgedanke von im (Modularität während der Produktion) wird ebenfalls ein Innovationsschub für die Gestaltung von Transporteinheiten erwartet; allerdings geringer als bei otram. Im Vergleich dazu sind ci, ci* und fm proprietär und damit weniger innovationsfördernd für andere Stakeholder in oder außerhalb der Branche.
- N32 Durch den im Betrieb modularen Aufbau bei sam und ibm können verbesserte Technologien frühzeitig eingesetzt werden indem einzelne Module ausgetauscht werden. Auch bei fm ist dies, wenn auch in geringerem Umfang, möglich. Bei den anderen FK ist ein Austausch der Module nicht möglich.
- N33 Vollautomatisiertes Fahren als kritischer Pfad verzögert die Einführung aller FK bis auf ci (SQ) signifikant (Kapitel 6.1).
- N34 Vollautomatisierte FK können im Gegensatz zu ci (SQ) potenziell Verkehre in Randzeiten verlagern und damit für eine Entzerrung sorgen (erhöhte Akzeptanz). sam können durch Transporteinheiten als Warenübergabestationen (z. B. Packstationen) 2. Reihe Parken vorbeugen (erhöhte Akzeptanz). Dies korreliert allerdings mit einer erhöhten Pick-up Entfernung (verringerte Akzeptanz). Generell können Warenübergabestellen potenziell neue Services anbieten (erhöhte Akzeptanz). Die vollautomatisierten FK werden definierte Abstellzonen beachten (erhöhte Akzeptanz). Für eine erhöhte Validität muss eine Akzeptanzstudie durchgeführt werden.
- N35 Vollautomatisierte FK benötigen im Gegensatz zu ci kein Fahrpersonal. otram FK ermöglichen eine Zustellung der Transporteinheiten, ohne dass Personal am Abstellort für den Pick-up erforderlich ist. Damit sind Nachtzulieferungen möglich, die erst am nächsten Morgen entladen werden.
- N36 Nur otram FK können potenziell sinnvoll temporär in Gebäude integriert werden, da bei den anderen FK in dem Fall auch die Fahreinheit für die Zeit im Gebäude stationär wäre. Allerdings ist bei ibm dazu überall entsprechende Wechsellinfrastruktur notwendig.
- N37 Eine vollständige Ökobilanz hängt von vielen Faktoren ab und kann in dieser qualitativen Diskussion nicht zuverlässig bewertet werden. An anderer Stelle der Arbeit wird eine detaillierte Ökobilanzierung durchgeführt (Kapitel 5.6). Es wird aber davon ausgegangen, dass die Automatisierung zusätzlich Energie und Material bedarf. Bei ibm wird zusätzliche Infrastruktur benötigt.
- N38 Der Paarvergleich beruht auf einer quantitativen Auswertung der Personen- und Gitterrollwagen-Kapazität je Fahrzeuggrundfläche (für jeden Fahrzeugklassen-Vertreter): $ci \approx ci^* \approx sam$; $fm \approx im \approx ibm$. In Betriebsszenarien in denen mehr Transport- als Fahreinheiten bei den modularen Konzepten erforderlich sind, benötigen diese zusätzliche Stellflächen für die die Transporteinheiten. Zudem benötigt ibm zusätzliche Infrastruktur für den Wechsel der Transporteinheiten.
- N39 Alle FK sind elektrisch. Lärm entsteht vorwiegend beim Ausladen der Waren aus der Transporteinheit. Durch die Modularität können sam und ibm Transporteinheiten nachts leise abstellen, wobei die Waren erst am nächsten Morgen ausgeladen werden und somit nachts tatsächlich leise

	angeliefert werden können. Bei fm könnten einzelne Einheiten abgestellt werden: einerseits sind diese kleiner als die im, ci und ci*; andererseits haben sie aber ebenfalls eine untätige Fahreinheit.
N40	Die Transporteinheiten der otm FK (sam und ibm) können bei Nichtnutzung potenziell gestapelt werden. Bei den anderen FK ist dies nicht sinnvoll möglich.
N41	Das Kriterium bezieht sich auf den Umschlag von Waren entlang der Lieferkette. Vor allem die otm FK sam und ibm bedingen in typischen Lieferkonzepten mehr Umschläge als der Status quo (ci) als Referenz. Im Vergleich zu ci werden auch ci*, im und fm in anderen Logistikkonzepten betrieben, die teilweise weitere Umschläge bedingen (aber weniger als otm). Im Unterschied zu ci und ci* sind die anderen FK auf den urbanen Einsatz und nicht für einen universellen Einsatz in Städten und Überland optimiert. Überlandtransporte, die in einigen Anwendungsfällen benötigt werden, können daher besser von ci und ci* erfüllt werden, ohne dass weitere Umschläge notwendig werden.
N42	otm FK (sam und ibm) können je nach Transportbedarf Transporteinheiten in geeigneter Größe aufnehmen, sodass die Auslastung der Transporteinheiten stets hoch ist. Die Fahreinheit bleibt allerdings dieselbe, sodass sich der Mehrwert vor allem in dem geringeren Leergewicht widerspiegelt (bedingt durch passende Transporteinheiten). fm passen sich dem aktuellen Bedarf an, indem mehrere Module im Platoon gekoppelt werden. ci, ci* und im haben feste Kapazitäten, weshalb deren Auslastung in Abhängigkeit des aktuellen Transportbedarfs schwankt.
N43	Bei im Betrieb modularen Ansätzen können Leerfahrten potenziell durch Disposition der Transporteinheiten auf nächstgelegene freie Fahreinheiten reduziert werden, wobei ibm dazu stets zurück in das Depot bzw. zu einer Wechselzone fahren muss. Bei fm können Einheiten bedarfsgerecht abgekoppelt werden wodurch sich die systemische Fahrleistung senken könnte.
N44	Von den niederkapazitiven und anwendungsspezifischen fm werden im Vergleich zu ci, ci* und im mehr Einheiten benötigt. Bei sam und ibm werden signifikant mehr Transporteinheiten aber weniger Fahreinheiten benötigt, gemessen an der Flottengröße der ci (SQ) Referenz. Insgesamt wird bei otm FK und fm eine Erhöhung der Einheiten gegenüber ci, ci* und im erwartet. Allerdings unterscheidet sich die Zusammensetzung der Flotte signifikant (kleine fm, Transporteinheiten und Fahreinheiten bei otm).
N45	Im Gegensatz zu ci, ci*, im und fm können die Transporteinheiten der otm FK sam und ibm potenziell auch von Transportmitteln anderer Verkehrsträger transportiert werden.
N46	Vollautomatisierte FK können im Gegensatz zu ci (SQ) potenziell Verkehre in Randzeiten verlagern und damit für eine Verkehrsverzerrung sorgen. Insbesondere sam aber auch ibm können durch Abkoppeln von Transporteinheiten eine effiziente und leise Nachtbelieferung gewährleisten, wodurch der Verkehr in die Nacht und damit noch mehr entzerrt werden kann.
N47	ci, ci*, im und fm sind nach Verlassen der Produktion an einen Einsatzzweck gebunden, bzw. können als universelle Transporteinheit für mehrere Einsatzzwecke genutzt werden, sind aber in diesem Fall für keinen spezifischen Einsatzzweck optimiert. fm können einzelne anwendungsoptimierte Module zu einem Platoon koppeln. sam und ibm FK haben eine universelle Fahreinheit, die für verschiedenste Zwecke eingesetzt werden kann; nur die Transporteinheit muss entsprechend gewechselt werden. Die Transporteinheiten bei sam und ibm sind nach Verlassen der Produktion anwendungsoptimiert und damit zweckgebunden.

- N48 Die Transporteinheiten bei sam und ibm stehen überwiegend still und sind zum Teil mit Energiespeicher ausgestattet. Am Stromnetz gekoppelt werden Vehicle-to-Grid-Services ermöglicht. Durch Bereitstellen der Batteriekapazität als Pufferspeicher werden zusätzliche Einnahmen generiert. Zudem können Transporteinheiten der otrm FK als mobile Werbeflächen vermietet werden. Gleiches gilt für die anderen FK. Bei sam kann die Werbung an beliebigen Orten abgestellt werden, während ibm an die Infrastruktur-Wechsel-Zonen gebunden ist.
- N49 Eine vollständige Lebenszykluskostenanalyse hängt von vielen Faktoren ab und kann in dieser qualitativen Diskussion nicht zuverlässig bewertet werden. An anderer Stelle der Arbeit wird eine detaillierte Kostenanalyse durchgeführt (Kapitel 5.5). Für den Paarvergleich wird angenommen, dass die fahrerlosen Konzepte geringe Kosten aufweisen, da Kosten für Fahrpersonal entfallen.
- N50 Vollautomatisierte FK benötigen im Gegensatz zu ci (SQ) kein Fahrpersonal mehr. Lagerpersonal wird FK-übergreifend benötigt. Personal für die Zustellung ist bei ci in der Regel auch für die Fahraufgabe zuständig und entfällt entweder bei den übrigen FK (vor allem bei ibm und sam durch Warenübergabestellen) oder wird zusätzlich benötigt.
- N51 Alle FK sind dafür ausgelegt, die primäre Transportaufgabe gleichermaßen zu erfüllen. Durch den Mehraufwand für die Kunden beim Pick-up in typischen Lieferkonzepten für FK ohne Fahrpersonal, müssen die Kosten des Lieferprozesses für die Kunden in bestimmten Einsatzzwecken gegebenenfalls reduziert werden.

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Tabelle F.3: Ergebnisse der Paarvergleiche im AHP

Erfüllungsgrade der Fahrzeugkonzepte; unter Beachtung von Rundungsfehlern ergibt die Summe der Erfüllungsgrade je Zeile 1; weitere Erklärungen in der Beschriftung von Tabelle F.2

Kriterium mit ID	ci (SQ) Van	otri-ci* RoboVan	otri-fm Flex	otri-im Mover	otrm-ibm iMod	otrm-sam U-Shift
N01	0,055	0,055	0,138	0,052	0,349	0,349
N02	0,058	0,058	0,200	0,135	0,156	0,394
N03	0,213	0,213	0,213	0,213	0,082	0,064
N04	0,456	0,231	0,095	0,095	0,027	0,095
N05	0,246	0,246	0,126	0,068	0,068	0,246
N06	0,214	0,214	0,071	0,071	0,214	0,214
N07	0,210	0,210	0,210	0,088	0,055	0,228
N08	0,573	0,112	0,112	0,112	0,046	0,046
N09	0,214	0,214	0,214	0,214	0,071	0,071
N10	0,140	0,140	0,292	0,292	0,068	0,068
N11	0,209	0,209	0,047	0,047	0,047	0,440
N12	0,032	0,065	0,155	0,065	0,155	0,528
N13	0,212	0,212	0,212	0,212	0,091	0,061
N14	0,330	0,330	0,060	0,150	0,060	0,060
N15	0,214	0,214	0,214	0,214	0,071	0,071
N16	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167	0,167
N17	0,300	0,300	0,100	0,100	0,100	0,100
N18	0,318	0,318	0,052	0,129	0,129	0,052
N19	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,038
N20	0,310	0,115	0,115	0,115	0,053	0,292
N21	0,303	0,221	0,09	0,221	0,082	0,082
N22	0,068	0,068	0,068	0,068	0,293	0,435
N23	0,246	0,246	0,068	0,246	0,126	0,068
N24	0,051	0,051	0,123	0,051	0,251	0,474
N25	0,352	0,165	0,165	0,165	0,100	0,055
N26	0,265	0,265	0,109	0,265	0,048	0,048
N27	0,222	0,222	0,222	0,222	0,022	0,089
N28	0,256	0,256	0,095	0,256	0,043	0,095
N29	0,117	0,117	0,117	0,294	0,294	0,060
N30	0,063	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188
N31	0,079	0,079	0,079	0,175	0,294	0,294
N32	0,079	0,079	0,175	0,079	0,294	0,294
N33	0,375	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125
N34	0,091	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182

N35	0,062	0,143	0,143	0,143	0,255	0,255
N36	0,120	0,120	0,120	0,120	0,204	0,317
N37	0,636	0,082	0,082	0,082	0,035	0,082
N38	0,130	0,130	0,330	0,260	0,090	0,060
N39	0,109	0,109	0,178	0,109	0,247	0,247
N40	0,125	0,125	0,125	0,125	0,250	0,250
N41	0,351	0,351	0,100	0,115	0,042	0,042
N42	0,079	0,079	0,175	0,079	0,294	0,294
N43	0,079	0,079	0,198	0,079	0,198	0,366
N44	0,246	0,246	0,060	0,246	0,101	0,101
N45	0,071	0,071	0,071	0,071	0,357	0,357
N46	0,043	0,084	0,084	0,084	0,352	0,352
N47	0,079	0,079	0,175	0,079	0,294	0,294
N48	0,096	0,096	0,096	0,096	0,248	0,368
N49	0,022	0,196	0,196	0,196	0,196	0,196
N50	0,063	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188
N51	0,375	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Tabelle F.4: Berechnete Nutzwerte je Nutzenkriterien

Nutzwert als Produkt aus Erfüllungsgrad (AHP, Tabelle F.3) und Kriteriengewichtung (Online-Umfrage, Tabelle E.5); weitere Erklärungen in der Beschriftung von Tabelle F.2

ID	ci (SQ) Van	otri-ci* RoboVan	otri-fm Flex	otri-im Mover	otrm-ibm iMod	otrm-sam U-Shift
N01	0,128	0,128	0,319	0,121	0,806	0,806
N02	0,191	0,191	0,660	0,446	0,517	1,303
N03	0,624	0,624	0,624	0,624	0,239	0,188
N04	1,482	0,751	0,310	0,310	0,088	0,310
N05	0,907	0,907	0,465	0,253	0,253	0,907
N06	0,758	0,758	0,253	0,253	0,758	0,758
N07	0,648	0,648	0,648	0,272	0,171	0,704
N08	1,512	0,294	0,294	0,294	0,121	0,121
N09	0,321	0,321	0,321	0,321	0,107	0,107
N10	0,257	0,257	0,535	0,535	0,124	0,124
N11	0,557	0,557	0,126	0,126	0,126	1,175
N12	0,078	0,160	0,382	0,160	0,382	1,299
N13	0,714	0,714	0,714	0,714	0,305	0,205
N14	1,170	1,170	0,213	0,532	0,213	0,213

N15	0,565	0,565	0,565	0,565	0,188	0,188
N16	0,303	0,303	0,303	0,303	0,303	0,303
N17	0,409	0,409	0,136	0,136	0,136	0,136
N18	0,637	0,637	0,105	0,258	0,258	0,105
N19	0,332	0,332	0,332	0,332	0,332	0,066
N20	1,098	0,407	0,407	0,407	0,189	1,037
N21	1,076	0,784	0,320	0,784	0,291	0,291
N22	0,192	0,192	0,192	0,192	0,825	1,227
N23	0,760	0,760	0,211	0,760	0,389	0,211
N24	0,152	0,152	0,370	0,152	0,752	1,421
N25	0,927	0,434	0,434	0,434	0,264	0,144
N26	0,626	0,626	0,259	0,626	0,114	0,114
N27	0,566	0,566	0,566	0,566	0,056	0,225
N28	0,744	0,744	0,276	0,744	0,125	0,276
N29	0,309	0,309	0,309	0,775	0,775	0,159
N30	0,216	0,648	0,648	0,648	0,648	0,648
N31	0,166	0,166	0,166	0,367	0,617	0,617
N32	0,245	0,245	0,539	0,245	0,908	0,908
N33	1,163	0,387	0,387	0,387	0,387	0,387
N34	0,290	0,578	0,578	0,578	0,578	0,578
N35	0,173	0,402	0,402	0,402	0,719	0,719
N36	0,204	0,204	0,204	0,204	0,346	0,539
N37	2,141	0,276	0,276	0,276	0,118	0,276
N38	0,293	0,293	0,746	0,594	0,213	0,133
N39	0,278	0,278	0,452	0,278	0,630	0,630
N40	0,193	0,193	0,193	0,193	0,386	0,386
N41	1,129	1,129	0,321	0,371	0,135	0,135
N42	0,254	0,254	0,559	0,254	0,940	0,940
N43	0,230	0,230	0,575	0,230	0,575	1,060
N44	0,639	0,639	0,156	0,639	0,263	0,263
N45	0,164	0,164	0,164	0,164	0,821	0,821
N46	0,112	0,219	0,219	0,219	0,915	0,915
N47	0,214	0,214	0,471	0,214	0,794	0,794
N48	0,125	0,125	0,125	0,125	0,322	0,479
N49	0,065	0,587	0,587	0,587	0,587	0,587
N50	0,188	0,563	0,563	0,563	0,563	0,563
N51	0,938	0,313	0,313	0,313	0,312	0,313

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Tabelle F.5: Berechnete Nutzwerte je Nutzenkategorie und Gesamtnutzen

Kategorienutzwerte als Mittelwert der entsprechenden Einzelnutzwerte (Tabelle F.4); Gesamtnutzen als Summenprodukt aus Kategorienutzwerten und Kategoriegewichtungen (Online-Umfrage, Tabelle E.6); weitere Erklärungen in der Beschriftung von Tabelle F.2

Bezeichnung	ci (SQ) Van	otri-ci* RoboVan	otri-fm Flex	otri-im Mover	otrm-ibm iMod	otrm-sam U-Shift
Betrieb ⁵⁵	0,622	0,466	0,412	0,310	0,308	0,650
Fahrzeug ⁵⁵	0,622	0,536	0,336	0,487	0,324	0,372
Strategie ⁵⁵	0,447	0,362	0,435	0,412	0,640	0,640
Umwelt & Umfeld ⁵⁵	0,510	0,318	0,407	0,361	0,427	0,466
Verkehr ⁵⁵	0,421	0,439	0,333	0,313	0,609	0,689
Wirtschaftlichkeit ⁵⁵	0,306	0,360	0,412	0,360	0,516	0,547
Gesamtnutzen	0,468	0,389	0,399	0,371	0,482	0,555

Quelle: Eigene Zusammenstellung

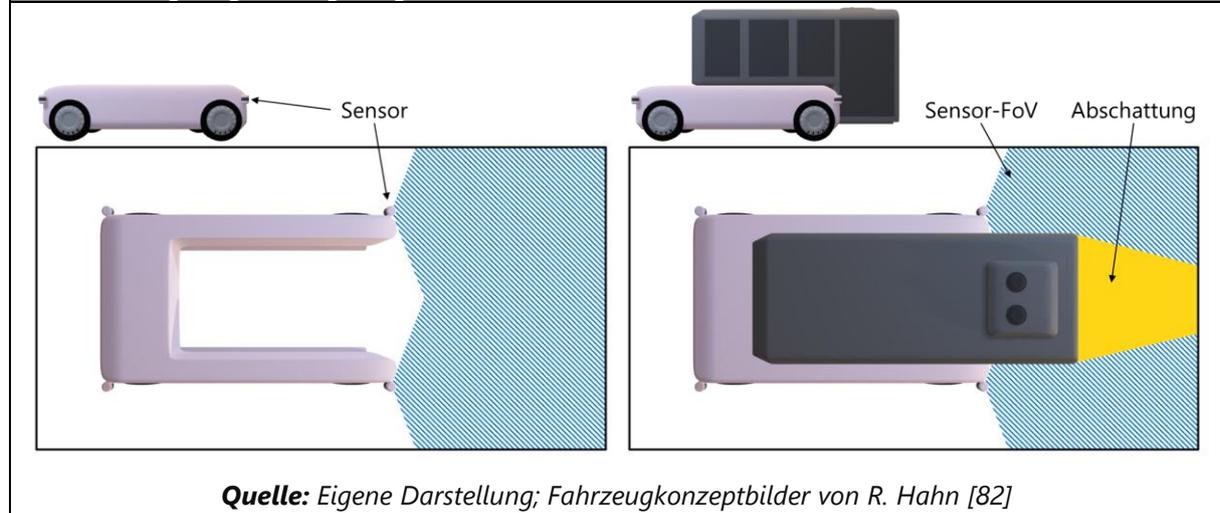
G Technische Merkmale von U-Shift

Die U-Shift-Fahreinheit nimmt verschiedene Transporteinheiten über eine Fahrwerksregulierung zwischen den Fahrschenkeln auf. Für einen seitlichen Einstieg benötigt eine Personen-Transporteinheit einen Überhang. Dadurch wird das **Field of View** (FoV, Sichtfeld) der rückwärtigen Sensoren der Fahreinheit beschränkt: Abbildung G.1. Für fahrerloses Rückwärtsfahren werden in dieser Konstellation entweder Sensoren in der Transporteinheit benötigt oder zusätzliche Unterstützung durch die Infrastruktur [401]. Dasselbe gilt für Güter-Transporteinheiten: Kurze Transporteinheiten für 3 Europaletten benötigen keine zusätzliche Sensorik, bei Transporteinheiten für 4 Europaletten wird das rückwärtige FoV der Fahreinheit ebenfalls beeinträchtigt.

⁵⁵ Kategorienutzwert für ~

Abbildung G.1: Field of View der U-Shift-Sensorik

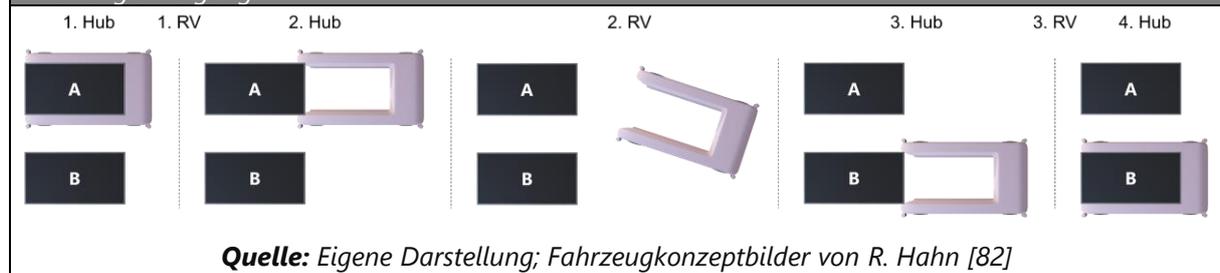
Die Öffnungswinkel und Sichtweiten der Sensoren sind nur beispielhafte Prinzipdarstellung; in der linken Bildhälfte ist das rückwärtige Sensor-Sichtfeld (Field of View, FoV) einer U-Shift-Fahrereinheit dargestellt (blau/ schraffiert), in der rechten Bildhälfte wird die Abschattung durch eine Personen-Transporteinheit mit Überhang dargestellt (gelb/ gefüllt)



Für die **Wechsel der Transporteinheiten** bei ibm- und sam-Fahrzeugen wird im Folgenden eine Wechseldauer abgeleitet. Bei dem Rangiervorgang von U-Shift in Abbildung G.2 sind zwei Stellplätze für Transporteinheiten nebeneinander verfügbar: A und B. Insgesamt werden 3 Rangiervorgänge und 4 Hubvorgänge benötigt.

Abbildung G.2: Rangiervorgänge beim Wechsel von Transporteinheiten durch U-Shift

RV: Rangiervorgang



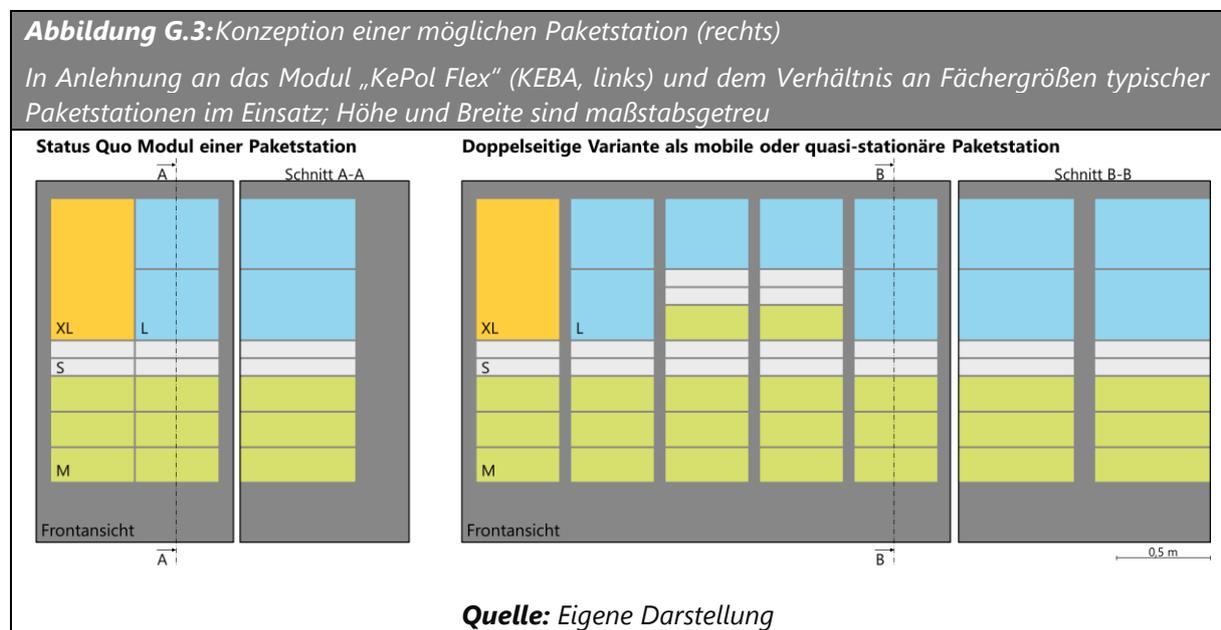
Für die Herleitung der Wechseldauer wird die Fallunterscheidung in Tabelle G.1 angenommen, wobei die Werte auf Spezifikation in Publikationen zu U-Shift beruhen [21]. Der worst case berücksichtigt Situationen in denen z. B. andere Verkehrsteilnehmer den Wechselvorgang stören. Für den Fall in Abbildung G.2 ergibt sich eine Dauer von 2 min. Steht nur eine Stellfläche zur Verfügung werden mehrere Rangiervorgänge benötigt.

Dadurch erhöht sich die Zeit auf 7 min. Die Transporteinheiten des iMod wird ausschließlich an definierten Wechselzonen mit Infrastrukturunterstützung gewechselt. Aufgrund dessen werden für den iMod Idealbedingungen und damit 1 min Wechselzeit angenommen.

Tabelle G.1: Fallunterscheidung zur Berechnung der Wechseldauer zweier Transporteinheiten			
Bezeichnung	best case	most likely case	worst case
Rangiervorgang [s]	7	15	60
Hubvorgang [s]	5	7	20
Wahrscheinlichkeit	20 %	60 %	20 %

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Zur Bestimmung der Anzahl von Paketfächern in einer quasi-stationären oder mobilen **Paketstation** wurde in Kapitel 5.1.2 (S. 101) der typische Aufbau von realen Paketstationen untersucht. Daraus wurde der Aufbau in Abbildung G.3 konzipiert. Dieser kann z. B. auf U-Shift-Transporteinheiten angewendet werden.



H Wechselkurse und Inflationsrate

Tabelle H.1: Wechselkurse sowie jährliche Inflationsrate in Deutschland				
Jahr	EUR→CHF	EUR→GBP	EUR→USD	Inflationsrate EUR [%]
1999	1,60	0,66	1,07	0,60
2000	1,56	0,61	0,92	1,40
2001	1,51	0,62	0,90	2,00
2002	1,47	0,63	0,95	1,30
2003	1,52	0,69	1,13	1,10
2004	1,54	0,68	1,24	1,70
2005	1,55	0,68	1,24	1,50
2006	1,57	0,68	1,26	1,60
2007	1,64	0,68	1,37	2,30
2008	1,59	0,80	1,47	2,60
2009	1,51	0,89	1,39	0,30
2010	1,38	0,86	1,33	1,10
2011	1,23	0,87	1,39	2,10
2012	1,21	0,81	1,28	2,00
2013	1,23	0,85	1,33	1,40
2014	1,21	0,81	1,33	1,00
2015	1,07	0,73	1,11	0,50
2016	1,09	0,82	1,11	0,50
2017	1,11	0,88	1,13	1,50
2018	1,16	0,88	1,18	1,80
2019	1,11	0,88	1,12	1,40
2020	1,07	0,89	1,14	0,50

Quelle: [441, 442]

I Fuzzylogik zur Restwertermittlung

Die Fuzzylogik kann bei der Restwertberechnung zur Transformation vager bzw. linguistischer Angaben in mathematisch exakte Ausdrücke eingesetzt werden, wenn keine mathematisch-statistischen Daten vorliegen [37, 443]. Mit der Fuzzylogik wird die zweiwertige Boolesche Logik $\{0; 1\}$ um weitere Werte auf dem Intervall $[0, 1]$ für unscharfe Zustände erweitert [443].

Tabelle I.1 zeigt die Fuzzy-Variablen, die die Restwertbetrachtung in Kapitel 4.3.3 (ab S. 63) beeinflussen, sowie deren Zuordnung zu den Technologiebereichen auf S. 64. Die einzelnen Fuzzy-Variablen werden erläutert, Hypothesen formuliert und mit linguistischen Werten belegt (Fuzzifizierung). Bei der Fuzzifizierung werden die Erfüllungsgrade der Fuzzy-Variablen auf dem Wertebereich [0,1] definiert [443, 444].

Tabelle I.1: Fuzzy-Variablen für die Restwertermittlung (Hypothese und Fuzzifizierung)			
Zuordnung der Fuzzy-Variable zu den Technologiebereichen auf S. 64 (Antrieb, Automatisierung und Modularisierung); ID entspricht der Variable j in Formel (4.21)			
ID	Fuzzy-Variable	Hypothese	Fuzzifizierung ⁵⁶
1	Infrastrukturdichte – Antrieb*	Eine hohe Netzabdeckung von Betankungs- bzw. Ladesäulen resultiert in einem hohen Wiederverkaufswert.	sehr gering; gering; mittel; hoch; sehr hoch
2	Infrastrukturdichte – Automatisierung	Beruht das Automatisierungskonzept auf der Infrastruktur, erhöht sich der Restwert, wenn diese Infrastrukturkomponenten weit verbreitet sind.	\triangleq Zelle darüber
3	Infrastrukturdichte – Modularisierung	Kommen infrastruktureitige Komponenten bei einem Wechsel der Transporteinheiten zum Einsatz, kann ein hoher Restwert nur erreicht werden, wenn diese Komponenten bereits eine hohe Marktdurchdringung haben, sich also etabliert haben. Dasselbe gilt für andere Anforderungen der Modularisierung, zum Beispiel Wechselzonen.	\triangleq Zelle darüber
4	Technologiereife – Antrieb*	Je geringer der Reifegrad ist, desto dynamischer ist die Entwicklung. Kurze Zyklen sind die Folge und resultieren in einem sinkenden Restwert.	Schrittmacher; Schlüssel; Basis
5	Technologiereife – Automatisierung	\triangleq Zelle darüber	\triangleq Zelle darüber
6	Einsatzzweck – Modularisierung	Kann eine Fahr- oder Transporteinheit in verschiedenen Branchen eingesetzt werden, ergibt sich ein höherer Wiederverkaufswert als bei Einheiten, die für spezifische Anwendungen entwickelt sind.	spezialisiert; vielseitig

Quelle: die mit einem Asterisk (*) gekennzeichneten Fuzzy-Variablen basieren auf Kleiner (2020) [37], die übrigen werden für diese Arbeit ergänzt (Kapitel 4.3.3)

⁵⁶ Geordnet von niedrig nach hoch, d. h. der erste Term entspricht dem Wert 0, der letzte 1. Dazwischen besteht ein gleichmäßiger Abstand zwischen den Termen.

Mit Hilfe von Inferenzregeln werden die Fuzzy-Variablen auf die zu betrachtenden Fahr- und Transporteinheiten angewendet und in einem abschließenden Schritt, der Defuzzifizierung, die unscharfe Menge in eine quantitative Größe überführt. Für diese Arbeit wird dazu der arithmetische Mittelwert nach Formel (4.21) gebildet. Andere Methoden der Defuzzifizierung sind z. B. die Schwerpunkt- oder die Maximum-Methode [444].

J Herstellkosten der Fahrzeugkonzepte

Zur **Abschätzung künftiger Verbesserungen** hinsichtlich der Herstellkosten durch technologische Fortschritte bei z. B. dem Materialeinsatz und der Produktion von Fahrzeugen werden Entwicklungsfaktoren abgeleitet. Diese werden benötigt um die neuartigen Fahrzeugkonzepte, die sich noch in der Entwicklung befinden, mit Referenzfahrzeugen in Serienproduktion vergleichen zu können. Als Zeithorizont wird das Zieljahr 2040 angenommen (Kapitel 5.1.1).

Die **Erfahrungskurventheorie** beschreibt die Reduktion der Herstellkosten HK eines Produkts bei jeder kumulierten Verdopplung der Produktionsmenge PM um die Lernrate LR : Formel (J.1) [211]. Je nach Branche werden unterschiedliche Lernraten angenommen: z. B. 15 % für elektrische Maschinen und Traktionsbatterien [37], 14 % für Fahrzeuge allgemein [211] sowie 15-25 % für Radar- und LiDAR-Systeme [257]. Es wird davon ausgegangen, dass modular gefertigte Produkte aufgrund ihrer Architektur höhere Lernraten erreichen [211].

$$HK_2 = HK_1 \left(\frac{PM_2}{PM_1} \right)^{\log_2(1-LR)} \quad (J.1)$$

mit Herstellkosten HK_1 und HK_2 bei kumulierten Produktionsmengen PM_1 und PM_2 ; LR : Lernrate

Für die generischen Fahrzeuge **Van und RoboVan** werden dieselben Herstellkosten für das Basisfahrzeug angenommen, wobei zusätzlich je nach Fahrzeug Kosten für die Traktionsbatterie und die Automatisierung anfallen. Der Neupreis NP für ein

Basisfahrzeug wird als Median der Elektrotransporter aus der ADAC-Datenbank mit 52.420 EUR₂₀₂₀ für 2020 ermittelt (Anhang B) [394]. Die Herstellkosten ergeben sich durch eine Division mit dem Retail Price Equivalent (RPE) von 1,45 (Kapitel 4.3, S. 58) zu 36.000 EUR₂₀₂₀. Die Batteriekosten werden entsprechend Kapitel 4.3 aus den Herstellkosten exkludiert und als laufende Kosten berücksichtigt. Mit einer angenommenen 6-fachen kumulierten Produktionsmenge⁵⁷ in 2040, einer Lernrate von 14 % [211] und einem Kostenanteil der Traktionsbatterie von 15 %⁵⁸ ergeben sich 21.000 EUR₂₀₂₀ für das Van- und RoboVan-Basisfahrzeug im Gütertransport im Jahr 2040. Fahrzeuge für den Personentransport werden als ca. 20 %⁵⁹ teurer als Fahrzeuge für den Gütertransport angenommen.

Für die **Automatisierung** der fahrerlosen RoboVan-Fahrzeuge werden aus Krail et al. (2019) zusätzlich 10.000 EUR₂₀₂₀ (inklusive RPE) angenommen [257]. Die Kosten für die Assistenzfunktionen der Van-Fahrzeuge sind Teil der in der ADAC-Datenbank hinterlegten Preise von Status quo-Fahrzeugen.

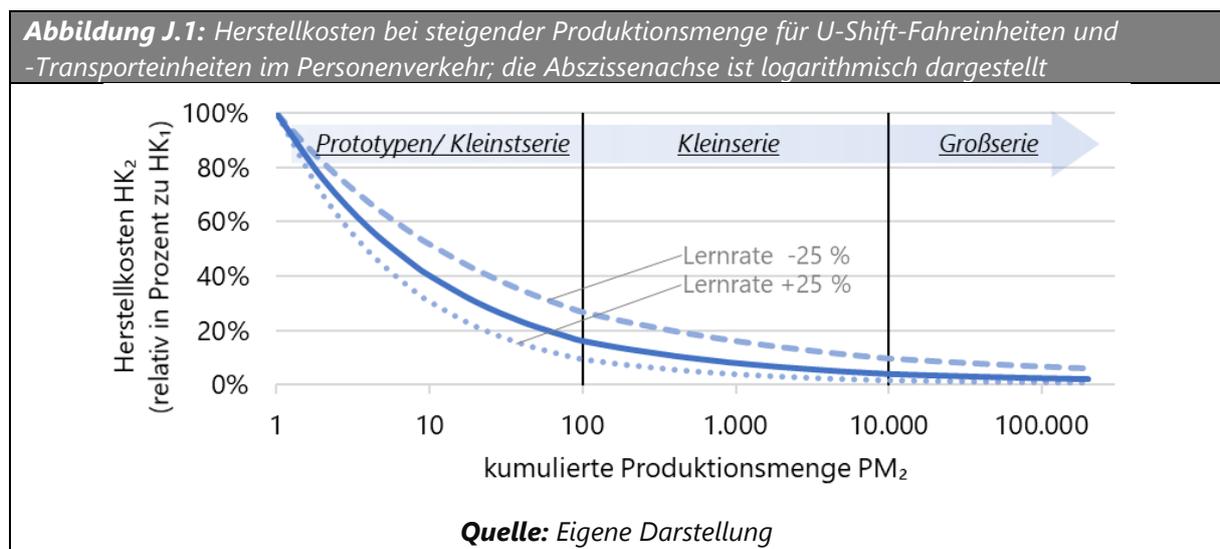
Für die **Herstellkosten der U-Shift**-Fahr- und Transporteinheiten liegen keine vergleichbaren Kosten vor, weshalb die Erfahrungskurventheorie auf Primärdaten zu U-Shift-Prototypenkosten angewendet wird. Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums mit Stückzahl 1 und der Erwartung, dass sich die vorhandenen Kosten zur Prototypenfertigung zu Beginn stärker reduzieren als mit steigender Produktionsreife [447], werden verschiedene Lernraten für die Produktionsphasen Prototyp/Kleinstserie, Kleinserie (ab 100 Stück) und Großserie (ab 10.000 Stück) angenommen, wobei die Lernrate je

⁵⁷ Im Referenzszenario des DLR Projekts VEU II wurden für das Jahr 2040 6,2-mal mehr Elektrofahrzeuge im deutschen Fahrzeugbestand prognostiziert als für 2020 [445]. Ähnliche Ergebnisse liefert die Shell Studie 2022 mit einer Vervielfachung um 5,8 [446]. Es wird unterstellt, dass sich die kumulierten Produktionszahlen für Elektrotransporter ähnlich entwickeln.

⁵⁸ Lebeau et al. (2019) haben einen Kostenanteil der Traktionsbatterie von 10–33 % an den Gesamtkosten aktueller Elektrofahrzeuge ermittelt [215]. Da die Batteriepreise in der Zukunft voraussichtlich sinken werden [251], wird ein Anteil von 15 % angenommen.

⁵⁹ Vergleich eines Mercedes-Benz Sprinter Kastenwagens mit einem Mercedes-Benz Sprinter Tourer [394].

Phase um 5 % reduziert wird. Die Lernrate der Fahreinheiten und der Personen-Transporteinheiten werden für die Großserienphase mit 14 % (vgl. Van und RoboVan) festgelegt. Die Lernrate der Transporteinheiten im Güterverkehr für eine Großserienproduktion wird an branchenüblichen Lernraten im Maschinenbau von 5–15 % [211] mit 10 % definiert. Abbildung J.1 zeigt den logarithmischen Verlauf der Herstellkosten für die U-Shift-Fahreinheiten, wobei Verläufe für eine ± 25 %-Variation der Lernraten zusätzlich dargestellt sind und für Sensitivitätsanalysen verwendet werden.



Zur Anwendung der Erfahrungskurventheorie wird eine kumulierte Absatzmenge von 10.000 U-Shift-Fahreinheiten bis 2040 in Anlehnung an die Entwicklung der Absatzzahlen der Streetscooter-Fahrzeuge als realistisch angenommen (10.000 Einheiten in den ersten 4 Jahren [448]). Abgeleitet aus dem Einsatzszenario (Kapitel 5.3) ergeben sich daraus die Absatzkennzahlen der Personen-, Citylogistik- und KEP-Transporteinheiten im Jahr 2040 zu 10.000, 450.000 und 1.140.000. Unter Anwendung der Erfahrungskurventheorie nach Formel (J.1) werden die **Herstellkosten der U-Shift Einheiten** auf Basis der Primärdaten für die Prototypenkosten ermittelt: Tabelle J.1.

Tabelle J.1: Herstellkosten der U-Shift-Einheiten für das Jahr 2040 in EUR₂₀₂₀

Abkürzungen: Fahreinheit (FE), Transporteinheit (TE), Personentransport (P), Paketdienst (KEP); Citylogistik (CL); #die KEP-TE wurde 2020 noch nicht aufgebaut, weshalb die Werte auf der CL-TE basieren; *Kosten exklusive Traktionsbatterie

Komponente	U-Shift FE 	U-Shift TE (P) 	U-Shift TE (KEP)# 	U-Shift TE (CL) 
Fahrwerk & Hubsystem	4.000	0	0	0
Brems- & Lenksystem	2.500	0	0	0
Interieur	0	4.500	1.000	0
Karosserie, Exterieur	3.500	5.500	1.500	2.000
Elektronik	2.500	1.500	1.000	500
Elektroantrieb	4.000	0	0	0
Batteriesystem*	4.500	2.500	1.000	0
Automatisierung ⁶⁰	7000	700	0	0
Herstellkosten*	28.000	14.700	4.500	2.500

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Tabelle 5.18 in Kapitel 5.5 stellt die Kosten der Fahrzeugalternativen vergleichend gegenüber.

⁶⁰ Für die Fahreinheit werden dieselben Automatisierungskosten angenommen wie für RoboVan-Fahrzeuge: 10.000 EUR₂₀₂₀ [257], bzw. 7.000 EUR₂₀₂₀ exklusive RPE. In der Transporteinheit für Personen werden 20 % der Sensoreinheiten einer U-Shift-Fahreinheit verbaut, allerdings keine teuren LiDAR-Systeme oder Recheneinheiten (Kapitel 5.4), weshalb anteilige Kosten von 1/10 angenommen werden.

K Wirkkategorien und Stoffstrommodelle für die Ökobilanzierung

Tabelle K.1: Wirkkategorien und Indikatoren für die Ökobilanzierung⁶¹

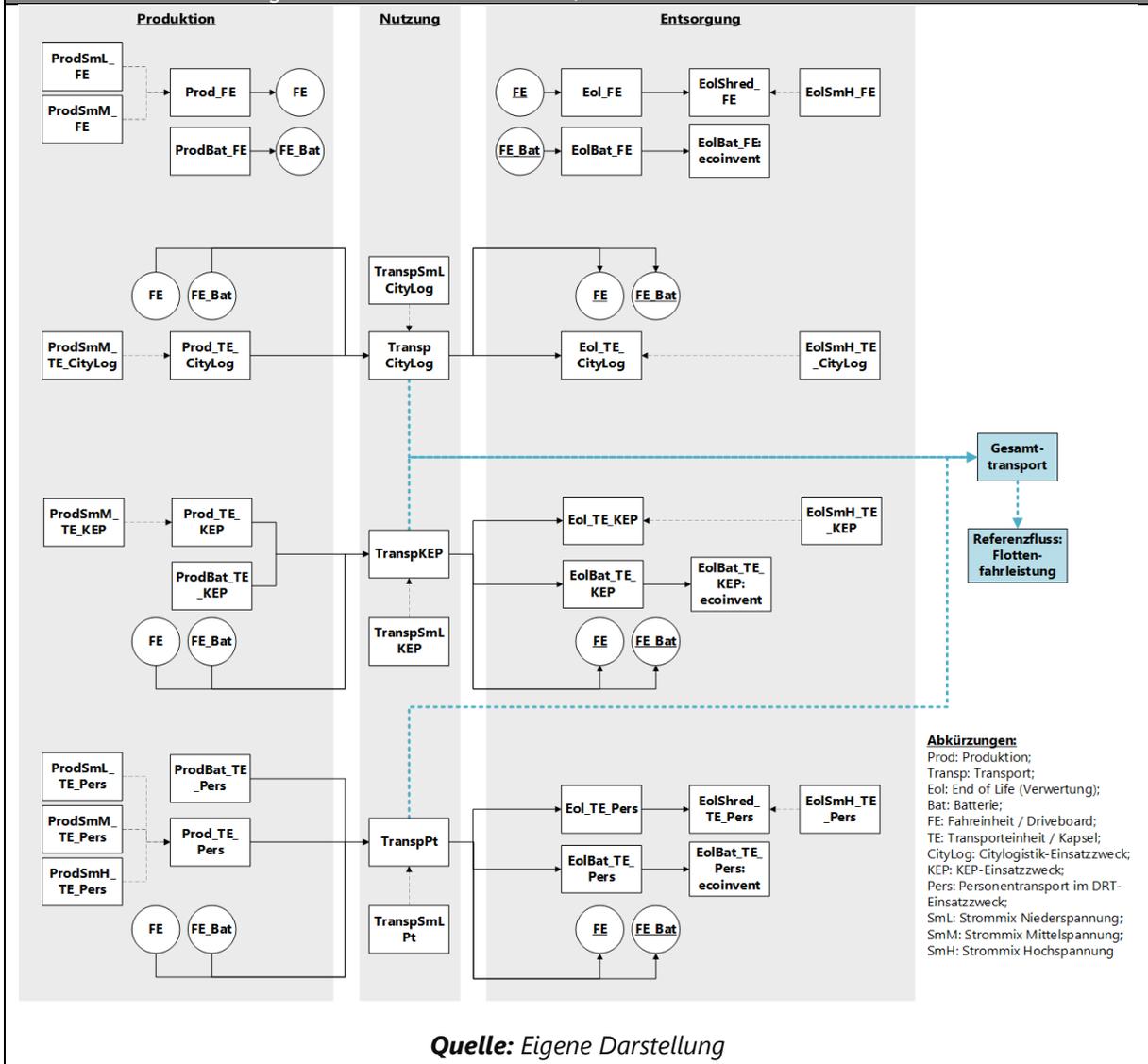
Für die mit einem Asterisk (*) gekennzeichneten Wirkkategorien werden in der Anwendung des Modells Detailanalysen durchgeführt; Abkürzungen: Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW); Dichlorbenzol (DCB); flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC)

Wirkkategorie	Indikator	Einheit
Klimawandel (CC)*	Treibhauspotenzial (GWP)*	kg CO ₂ -Äq
Ozonabbau (OD)	Ozonabbaupotenzial (ODP)	kg FCKW-11-Äq
Terrestrische Versauerung (TA)*	Terrestrisches Versauerungspotenzial (TAP)*	kg SO ₂ -Äq
Süßwasser-Eutrophierung (FE)	Potenzial zur Süßwasser-Eutrophierung (FEP)	kg P-Äq
Marine Eutrophierung (ME)	Potenzial zur marinen Eutrophierung (MEP)	kg N-Äq
Humantoxizität (HT)*	Humantoxizitätspotenzial (HTP)*	kg 1,4-DCB-Äq
Photochemische Ozonbildung (POF)*	Photochemisches Ozonbildungspotenzial (POFP)*	kg NMVOC-Äq
Feinstaubbildung (PMF)*	Feinstaubbildungspotenzial (PMFP)*	kg PM ₁₀ -Äq
Terrestrische Ökotoxizität (TET)	Terrestrisches Ökotoxizitätspotenzial (TETP)	kg 1,4-DCB-Äq
Süßwasser-Ökotoxizität (FET)	Süßwasser-Ökotoxizitätspotenzial (FETP)	kg 1,4-DCB-Äq
Marine Ökotoxizität (MET)	Potenzial zur marinen Ökotoxizität (METP)	kg 1,4-DCB-Äq
Ionisierende Strahlung (IR)	Potenzial zur ionisierenden Strahlung (IRP)	kg U ²³⁵ -Äq
Nutzung von Agrarflächen (ALO)	Potenzial zur Nutzung von Agrarflächen (ALOP)	m ² p. a.
Nutzung urbaner Flächen (ULO)	Potenzial zur Nutzung urbaner Flächen (ULOP)	m ² p. a.
Transformation natürlicher Flächen (NLT)	Potenzial zur Transformation natürlicher Flächen (NLTP)	m ²
Wasserverknappung (WD)*	Wasserverknappungspotenzial (WDP)*	m ³ Wasser-Äq
Mineralienabbau (MRD)*	Potenzial zum Abbau von Mineralien (MDP)*	kg Fe-Äq
Abbau fossiler Ressourcen (FD)	Potenzial zum Abbau fossiler Ressourcen (FDP)	kg Öl-Äq

Quelle: übersetzt aus [293]

⁶¹ In der ReCiPe-Methode sind drei Szenarien verfügbar, die die Unsicherheiten bei der Berechnung unterschiedlich adressieren. Für die Arbeit wird die Perspektive H (hierarchisch) gewählt, welche häufig die Grundlage für Politik und Gesetzgebung ist. Die Perspektive bestimmt zudem den Zeithorizont der

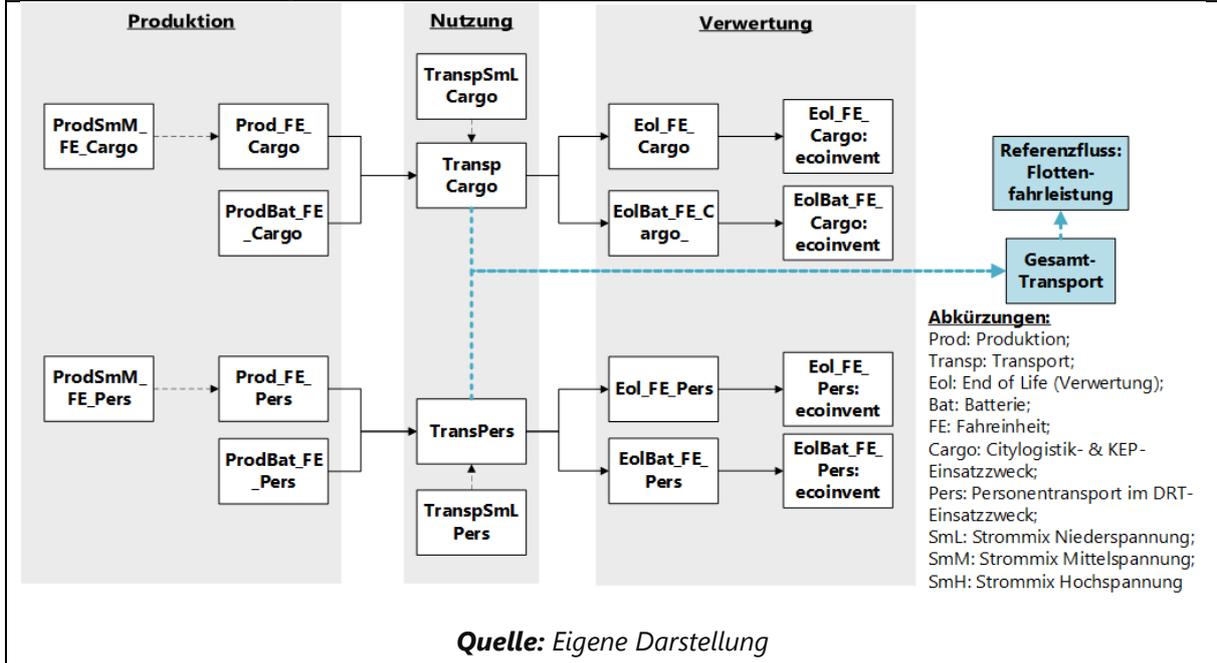
Abbildung K.1: Stoffstrommodell des Fahrzeugkonzepts U-Shift
 Abstrahierte Darstellung des Modells in der LCA-Software Umberto



Charakterisierungsfaktoren: z. B. wird für GWP in Perspektive H eine Verweildauer der Gase in der Atmosphäre von 100 Jahren angenommen (GWP100) [293].

Abbildung K.2: Stoffstrommodell der Fahrzeugkonzepte Van und RoboVan

Abstrahierte Darstellung des Modells in der LCA-Software Umberto



L Ergänzungen zur prospektiven Technologieentwicklung

Tabelle L.1: Quellen der Publikationsanalyse zu Automatisierungslevel

Das Literaturverzeichnis für die in dieser Tabelle aufgeführten Quellen folgt direkt nach der Tabelle; die Quellen werden nicht in das Haupt-Literaturverzeichnis der Arbeit aufgenommen

Kategorie	Quellen
Beratungsunternehmen	Bernhart und Ernst, 2018; Boston Consulting Group, 2015; Boston Consulting Group, 2020; Deloitte, 2019; GlobalData Thematic Research, 2021; Heineke et al., 2021; IDTechEx, 2021; IHS Markit, 2014; KPMG International, 2020; KPMG, 2015; M14 Intelligence, 2020; McKinsey & Company, 2019; McKinsey & Company, 2020; McKinsey & Company, 2021; Morgan Stanley, 2013; Oliver Wyman, 2015; Ptolemus, 2017; PWC, 2019; Yole Développement, 2015
Industrieverband	Dörr et al., 2021; EPoSS, 2015; VDA, 2015; VDA, 2021
OEM/Zulieferer	BMW, 2019; Chan, 2017; Crowe, 2021; Daimler Truck, 2022; Daimler, 2020; e.Go, 2021; Geely Auto, 2021; Honda, 2017; Honda, 2021; Hyundai, 2021; MAN, 2021; Toyota, 2020; Volkswagen AG, 2021; Wayland, 2021; Waymo, 2021; ZF-Friedrichshafen AG, 2015; ZF-Friedrichshafen AG, 2021
Politik	BMVI, 2021; BMVit, 2016; ERTRAC, 2015; ERTRAC, 2017; ERTRAC, 2019; Europäische Kommission, 2019; Europäisches Parlament, 2016; Finnish Transport Agency, 2016; Japan Automobile Manufacturers Association, 2016; NHTSA, 2014; Pillath, 2016; Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr, 2021
Wissenschaft	Boghani et al., 2019; CEDR, 2017; Center for Automotive Research, 2019; Clavert et al., 2016; Institute for Mobility Research, 2016; Krail et al., 2019; Lalli, 2020; Levinson, 2015; Litman, 2021; Roos und Siegmann, 2020; Tyagi und Aswathy, 2021

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Das folgende Verzeichnis ergänzt die Quellennachweise in Tabelle L.1; im Literaturverzeichnis der Arbeit werden diese Quellen nicht aufgelistet:

Bernhart, Wolfgang; Ernst, Christian-Simon (2018): Israel's automotive & smart mobility industry. Roland Berger GmbH.

BMVI (2021): Gesetz zum autonomen Fahren tritt in Kraft. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/gesetz-zum-autonomen-fahren.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.

BMVit (2016): AustrianResearch, Development & Innovation Roadmap for Automated Vehicles. Online verfügbar unter https://www.ffg.at/sites/default/files/downloads/call/austrian_roadmap_automated_vehicles.pdf, zuletzt geprüft am 09.09.2021.

BMW (2019): Autonomes Fahren. Online verfügbar unter <https://www.bmwgroup.com/de/innovation/technologie-und-mobilitaet/autonomes-fahren.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.

Boghani, H.C.; Papazikou, E.; Zwart, R.d.; Roussou, J.; Hu, B.; Filtness, A.; Papadoulis, A. (2019): Defining the future of passenger car transport. Deliverable D6.1 of the H2020 project LEVITATE. Online

- verfügbar unter <https://levitate-project.eu/wp-content/uploads/2019/11/D6.1-Defining-the-future-of-passenger-car-transport.pdf>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Boston Consulting Group (2015): Back to the Future: The Road to Autonomous Driving, 2015. Online verfügbar unter <https://de.slideshare.net/TheBostonConsultingGroup/the-road-to-autonomous-driving>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Boston Consulting Group (2020): Mobility. Online verfügbar unter <https://www.bcg.com/de-de/industries/public-sector/mobility>, zuletzt geprüft am 09.04.2021.
- CEDR (2017): MANTRA. Online verfügbar unter <https://www.cedr.eu/download/D2.1-Vehicle-fleet-penetrations-and-ODD-coverage.pdf>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Center for Automotive Research (CAR) (2019): Technology Roadmap. Intelligent Mobility Technologies. Online verfügbar unter <https://www.cargroup.org/wp-content/uploads/2019/09/Technology-Roadmap-White-Paper.pdf>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Chan, Ching-Yao (2017): Advancements, prospects, and impacts of automated driving systems. In: International Journal of Transportation Science and Technology 6 (3), S. 208–216. DOI: 10.1016/j.ijst.2017.07.008.
- Clavert, Simeon C.; Wilmink, Isabel R.; Soekroella, Aroen M.G.; van Arem, Bart (2016): Considering knowledge gaps for automated driving in conventional traffic. In: Fourth International Conference on Advances in Civil, Structural and Environmental Engineering - ACSEE 2016. Fourth International Conference on Advances in Civil, Structural and Environmental Engineering - ACSEE 2016: Institute of Research Engineers and Doctors, S. 102–111.
- Crowe, Steve (2021): AutoX opens robotaxi service to public in Shenzhen, 2021. Online verfügbar unter <https://www.therobotreport.com/autox-shenzhen-robotaxi-service-opens-to-public/>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Daimler (2020): Hochautomatisiertes Fahren: Die S-Klasse fährt voran. Online verfügbar unter <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Hochautomatisiertes-Fahren-Die-S-Klasse-faehrt-voran.xhtml?oid=47164442>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Daimler Truck (2022): Unser Weg zum autonomen Lkw. Online verfügbar unter <https://www.daimler-truck.com/innovation/autonomes-fahren/unser-weg-zum-autonomen-lkw.html>, zuletzt geprüft am 14.12.2022.
- Deloitte (2019): Urbane Mobilität und autonomes Fahren im Jahr 2035. Online verfügbar unter <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/trends/urbane-mobilitaet-autonomes-fahren-2035.html>, zuletzt geprüft am 13.10.2020.
- Dörr, Nora; Dörrmann, Lydia; Klebsch, Wolfgang; Oleniczak, Annelie (2021): Logistik, Energie und Mobilität 2030. Metastudie im BMWi Technologieprogramm IKT für Elektromobilität. Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE).
- e.Go (2021): e.GO Mover erhält Straßenzulassung. Online verfügbar unter <https://mediacenter.e-gomobile.com/de/newspool/pressemitteilung-e-go-mover-erhaelt-strassenzulassung/>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- EPoSS (2015): European Roadmap Smart Systems for Automated Driving. Online verfügbar unter <http://www.a3ps.at/site/sites/default/files/newsletter/2015/no08/EPOSS.pdf>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- ERTRAC (2015): Automated Driving Roadmap. ERTRAC Working Group "Connectivity and Automated Driving. Online verfügbar unter https://www.ertrac.org/uploads/documentsearch/id38/ERTRAC_Automated-Driving-2015.pdf, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- ERTRAC (2017): Automated Driving Roadmap. ERTRAC Working Group "Connectivity and Automated Driving. Online verfügbar unter https://www.ertrac.org/uploads/images/ERTRAC_Automated_Driving_2017.pdf, zuletzt geprüft am 09.09.2021.

- ERTRAC (2019): Connected Automated Driving Roadmap. ERTRAC Working Group "Connectivity and Automated Driving. Brussels. Online verfügbar unter <https://www.ertrac.org/uploads/documentse-arch/id57/ERTRAC-CAD-Roadmap-2019.pdf>, zuletzt geprüft am 16.07.2019.
- Europäische Kommission (2019): The future of road transport. implications of automated, connected, low-carbon and shared mobility.
- Europäisches Parlament (2016): Automated vehicles in the EU. Online verfügbar unter [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573902/EPRS_BRI\(2016\)573902_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573902/EPRS_BRI(2016)573902_EN.pdf), zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Finnish Transport Agency (2016): Road Transport Automation Road Map and Action Plan 2016–2020. Online verfügbar unter https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2016-19eng_road_transport_web.pdf, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Geely Auto (2021): Geely Auto Group Unveils Smart Geely 2025 Strategy. Online verfügbar unter <http://global.geely.com/media-center/news/geely-auto-group-unveils-smart-geely-2025-strategy/>, zuletzt geprüft am 14.12.2022.
- GlobalData Thematic Research (2021): Autonomous Vehicles. 2020 Update. Thematic Research.
- Heineke, Kersten; Heuss, Ruth; Kelkar, Ani; Kellner, Martin (2021): What's next for autonomous vehicles? McKinsey & Company. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/features/mckinsey-center-for-future-mobility/our-insights/whats-next-for-autonomous-vehicles>, zuletzt geprüft am 14.12.2022.
- Honda (2017): Automated drive. Online verfügbar unter <https://global.honda/innovation/automated-drive/detail.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Honda (2021): Honda to Begin Sales of Legend with New Honda SENSING Elite. Online verfügbar unter <https://global.honda/newsroom/news/2021/4210304eng-legend.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Hyundai (2021): Autonomous. Online verfügbar unter <https://tech.hyundaimotorgroup.com/mobility-device/autonomous/>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- IDTechEx (2021): Autonome Autos, Robotaxis & Sensoren 2022-2042. Online verfügbar unter <https://www.idtechex.com/de/research-report/autonomous-cars-robotaxis-and-sensors-2022-2042/832>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- IHS Markit (2014): Emerging Technologies. Online verfügbar unter https://autotechinsight.ihs-markit.com/_assets/sampleddownloads/auto-tech-report-emerging-tech-autonomous-car-2013-sample_1404310053.pdf, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Institute for Mobility Research (IFMO) (2016): Autonomous Driving. The Impact of Vehicle Automation on Mobility Behaviour.
- Japan Automobile Manufacturers Association (JAMA) (2016): On the road to automated driving. A JAMA overview of the advances made so far and the further progress required to make automated driving a reality. Online verfügbar unter http://www.jama-english.jp/publications/On_the_road_to_automated_driving.pdf, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- KPMG (2015): Connected and Autonomous Vehicles – The UK Economic Opportunity. Online verfügbar unter <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/images/2015/05/connected-and-autonomous-vehicles.pdf>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- KPMG International (2020): Autonomous Vehicles Readiness Index. Online verfügbar unter <https://assets.kpmg/content/dam/kpmg/uk/pdf/2020/07/2020-autonomous-vehicles-readiness-index.pdf>, zuletzt geprüft am 19.05.2022.
- Krail, Michael; Hellekes, Jens; Schneider, Uta; Dütschke, Elisabeth; Schellert, Maximilian; Rüdiger, David et al. (2019): Energie- und Treibhausgaswirkungen des automatisierten und vernetzten Fahrens im Straßenverkehr. Fraunhofer ISI; Fraunhofer IML; PTV AG; PTV Transport Consult GmbH; TU Hamburg-Harburg - VPL; M-Five. Karlsruhe.

- Lalli, Marco (2020): *Autonomes Fahren und die Zukunft der Mobilität*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Levinson, David (2015): *Climbing Mount Next: The Effects of Autonomous Vehicles on Society*. Online verfügbar unter https://conservancy.umn.edu/bitstream/handle/11299/172960/6%20MJLST_v162_Levinson_787-810.pdf?sequence=1&isAllowed=y, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Litman, Todd (2021): *Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning*. Victoria Transport Policy Institute. Online verfügbar unter <https://www.vtppi.org/avip.pdf>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- M14 Intelligence (2020): *ADAS and Autonomous Driving LiDAR Technology Market*. Edition 2020.
- MAN (2021): *MAN setzt auf autonome Lkw*. Online verfügbar unter <https://www.mantruckandbus.com/de/innovation/man-setzt-voll-auf-autonome-trucks.html>, zuletzt aktualisiert am 17.06.2022, zuletzt geprüft am 14.12.2022.
- McKinsey & Company (2019): *How China will help fuel the revolution in autonomous vehicles*. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/how-china-will-help-fuel-the-revolution-in-autonomous-vehicles>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- McKinsey & Company (2020): *Private autonomous vehicles: The other side of the robo-taxi story*. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/private-autonomous-vehicles-the-other-side-of-the-robo-taxi-story>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- McKinsey & Company (2021): *Autonomous Driving*. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/features/mckinsey-center-for-future-mobility/overview/autonomous-driving>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Morgan Stanley (2013): *Autonomous Cars. Self-Driving the New Auto Industry Paradigm*.
- NHTSA (2014): *Human Factors Evaluation of Level 2 And Level 3 Automated Driving Concepts*. Online verfügbar unter https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/812043_hf-evaluationlevel2andlevel3automateddrivingconcepts2.pdf, zuletzt geprüft am 19.05.2022.
- Oliver Wyman (2015): *The true value of autonomous driving*. Online verfügbar unter <https://www.oliverwyman.de/content/dam/oliver-wyman/global/en/2015/jul/Oliver-Wyman-6-11-Automotive-Manager-2015-Autonomous-Driving.pdf>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Pillath, Susanne (2016): *Automated vehicles in the EU*. Europäisches Parlament; European Parliamentary Research Service (EPRS) (PE 573.902).
- Ptolemus (2017): *The Autonomous Vehicle Global Study*. Online verfügbar unter <https://www.ptolemus.com/research/theautonomousvehicleglobalstudy2017/>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- PWC (2019): *Digital Auto Report*. Online verfügbar unter <https://www.strategyand.pwc.com/de/en/industries/automotive/digital-auto-report.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Roos, Michael; Siegmann, Marvin (2020): *Technologie-Roadmap für das autonome Autofahren. Eine wettbewerbsorientierte Technik- und Marktstudie für Deutschland*. Online verfügbar unter <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/222428/1/1724770225.pdf>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr (2021): *Auswirkung der Einführung des autonomen Fahrens auf die Beschäftigung im Öffentlichen Personennahverkehr*.
- Toyota (2020): *TOYOTA AUTOMATED DRIVING*. Online verfügbar unter <https://automatedtoyota.com/docs/10/1a0b46b2c789165fdf296ad6d74e796f2b57837f9/ATwhitepaper.pdf>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Tyagi, Amit Kumar; Aswathy, S. U. (2021): *Autonomous Intelligent Vehicles (AIV): Research statements, open issues, challenges and road for future*. In: *International Journal of Intelligent Networks* 2, S. 83–102. DOI: 10.1016/j.ijin.2021.07.002.
- VDA (2015): *Automation. From Driver Assistance Systems to Automated Driving*. Berlin, Germany: Verband der Automobilindustrie e. V.

VDA (2021): Automatisiertes Fahren. Online verfügbar unter <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/automatisiertes-fahren/automatisiertes-fahren.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.

Volkswagen AG (2021): Volkswagen Nutzfahrzeuge treibt die Entwicklung autonomer Systeme für Mobility as a Service voran. Online verfügbar unter <https://www.volkswagen.com/de/news/2021/02/volkswagen-commercial-vehicles-moves-ahead-with-autonomous-drivi.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.

Wayland, Michael (2021): Cruise expects GM to begin production of new driverless vehicle in early 2023, 2021. Online verfügbar unter <https://www.cnbc.com/2021/05/13/gm-to-begin-production-of-new-driverless-cruise-vehicle-in-early-2023.html>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.

Waymo (2021): FAQ. Online verfügbar unter <https://waymo.com/faq/>, zuletzt geprüft am 09.09.2021.

Yole Développement (2015): Sensors and Data Management for Autonomous Vehicles. Online verfügbar unter https://yole-i-micronews-com.osu.eu-west-2.outscale.com/uploads/2019/03/Yole_Sensors_and_Data_Management_for_Autonomous_Vehicles_October_2015_Sample.pdf, zuletzt geprüft am 23.08.2019.

ZF-Friedrichshafen AG (2015): Magazin. Online verfügbar unter https://www.zf.com/corporate/de_de/magazine/magazin_artikel_viewpage_22123624.html, zuletzt geprüft am 09.09.2021.

ZF-Friedrichshafen AG (2021): In fünf Schritten zum selbstfahrenden Auto. Online verfügbar unter https://www.zf.com/mobile/de/stories_2497.html, zuletzt geprüft am 09.09.2021.

Tabelle L.2: Modulliste mit Zuordnung der Technologien

Beschreibung der Technologien in Tabelle L.3

ID	Bezeichnung	Technologien im Modul
M01	Radar	T01, T02, T03, T04, T05
M02	LiDAR	T05, T06, T07, T08, T09, T10, T11, T12, T13, T14, T15, T16
M03	Kamera	T05, T17, T18, T19, T20, T21
M04	Ultraschall	T05, T22, T23
M05	Aktuatoren	T24, T25
M06	X-by-Wire	T26, T27
M07	Positionsbestimmung	T28, T29, T30, T31, T32, T33, T34
M08	Satellitenbasierte Positionsbestimmung	T35, T36, T37, T38, T39
M09	Langstreckenkommunikation	T03, T34, T40, T41, T42
M10	Kurzstreckenkommunikation	T42, T43, T44, T45, T46
M11	Fahrzeuginterne Kommunikation	T47, T48, T49
M12	E/E (Elektrik/Elektronik)	T26, T27, T47, T48, T49, T50, T51, T52
M13	Mikrosystemtechnik (Enabler-Technologien)	T53, T54, T55, T56, T57

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Tabelle L.3: Beschreibung technologischer Entwicklungen mit Relevanz für die Automatisierung

Die Reifegrade sind in Tabelle 4.7 definiert; die zeitliche Entwicklung der Technologien wurde von Expertinnen und Experten in einer Delphi-Befragung (Kapitel 6.1.2) ermittelt (Stand des Wissens: 2020), die auch die Kurzbeschreibungen verifiziert haben; Zuordnung zu den Modulen in Tabelle L.2

Technologie (ID)	Beschreibung und zeitliche Entwicklung
79 GHz-Radar (T01)	79 GHz-Radar-Systeme nutzen wie die Konkurrenztechnologien, 24 GHz und 77 GHz, das FMCW-Verfahren, um mittels Frequenzmustervergleich des emittierten und reflektierten Signals, Richtung, Entfernung und relative Geschwindigkeit der Objekte in der Umgebung zu bestimmen. Der 79 GHz-Technologie steht ein breites Frequenzband von 4 GHz (77-81 GHz) zur Verfügung. Dadurch kann das Frequenzmuster des gesendeten Signals stärker variiert werden als bei konkurrierenden Systemen. Die Auflösung verbessert sich dadurch deutlich. MRL8: <2019; MRL9: 2021; MRL10: 2022
Miniaturisierung (T02)	Die Miniaturisierung von Radarsensoren ermöglicht ihre unauffällige Integration in das Fahrzeug. Bei gleichzeitig gleichbleibenden bzw. reduzierten Kosten können mehr Sensoren verbaut werden, um so ein dezentrales Radar-Sensornetzwerk zu etablieren. Ein bereits realisiertes Projekt ist ein Radar-Frontend (der komplette Analogteil des Radars inklusive Antenne) in einem 5 x 5 mm ² großen Gehäuse. Die Miniaturisierung wird durch die Integration des Radars inklusive der Antenne auf einem Halbleiter-Chip ermöglicht (Radar on a Chip). TRL1: <2019; TRL2-4: 2019; TRL58: 2021; MRL8: 2024; MRL9: 2026; MRL10: 2027
OFDM RadCom (T03)	Sowohl die 5G-Kommunikation als auch Radarsysteme können mit OFDM-Wellenformen (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) betrieben werden. OFDM ist ein Verfahren zur digitalen Datenübertragung. Dabei wird ein Datenstrom über eine große Anzahl von schmalen Frequenzträgern innerhalb eines Frequenzbereichs verteilt. OFDM ist ein sehr robustes Verfahren zur Datenübertragung, da nur einzelne Frequenzen betroffen sind wenn das Spektrum gestört wird. Durch die Implementierung von MIMO (Multiple Input Multiple Output) wird das Radar-System als Multi-Sender-Empfänger-Antennenanordnung konzipiert, die jeweils unabhängige Wellenformen sendet und empfängt. Dies ermöglicht die Strahlformung des Signals. MIMO OFDM erlaubt die Verknüpfung der Funktionen „Radar“ und „4G/5G“, da beide die gleiche Bandbreite nutzen. TRL1: <2019; TRL2-4: 2019; TRL58: 2021; MRL8: 2024; MRL9: 2027; MRL10: 2030
Radar im niedrigen THz-Bereich (T04)	Heutige Radar-Systeme operieren bei Frequenzen von 24 GHz, 77 GHz oder (in Zukunft) 79 GHz. Seit einigen Jahren zeichnet sich eine Entwicklung hin zu Frequenzen >100 GHz ab (ca. 150-600 GHz). Ab 100 GHz (0,1 THz) spricht man von Radar-Systemen im niedrigen THz-Bereich. Die höheren Frequenzen ermöglichen eine erhöhte Winkelauflösung. TRL1: <2019; TRL2-4: 2019; TRL58: 2025; MRL10: 2032
Sensorfusion (T05)	Für das autonome Fahren kommen unterschiedliche Sensoren wie Radar, Kamera, LiDAR oder Ultraschall zum Einsatz. Erst die Kombination der Informationen aller Sensoren bietet die Grundlage für das autonome Fahren. Dieses Zusammenwirken der unterschiedlichen Sensoren wird als Sensorfusion bezeichnet. Sensorfusion umfasst aber nicht nur die Sensor-

	<p>daten, sondern auch die Integration von Daten aus der Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern (V2X) sowie von Navigations- bzw. Kartendaten. Die redundante Wahrnehmung ist eine Anforderung der funktionalen Sicherheitsstufe ASIL D.</p> <p>TRL1: <2019; TRL2-4: 2019; TRL58: 2021; MRL8: 2023; MRL9: 2024; MRL10: 2024</p>
Flash LiDAR (T06)	<p>Anders als die anderen Ansätze für LiDAR-Systeme verzichtet das Flash LiDAR darauf, das Field of View (FoV) mit einem Laserstrahl sequentiell abzutasten (scannen), sondern arbeitet eher wie eine Kamera: Ein Laserpuls wird von der Optik (Diffusor & Linse) so gestreut, dass er die gesamte Szene (bedingt durch das FoV) auf einmal beleuchtet. Das reflektierte Licht wird von einem Sensor-Array detektiert.</p> <p>TRL58: <2019; MRL8: 2019; MRL9: 2022; MRL10: 2023</p>
LCM LiDAR (T07)	<p>Neben den OPA LiDAR-Systemen sind LCM LiDAR-Systeme die einzigen Scanning LiDAR-Systeme ohne bewegliche Elemente. Sie basieren wie auch OPA auf Phasenverschiebung. Die Erzeugung der Verschiebung unterscheidet sich allerdings: Es wird ein Metamaterial aus Flüssigkristallen (LCM, Liquid Crystal Metasurface) verwendet, welches aus einzelnen adressierbaren Bereichen besteht. Je nach Spannung am optischen Element wird der eintreffende Laserstrahl aus einer Lichtquelle gegenüber anderen Pixeln verlangsamt. Dadurch entstehen Phasenverschiebungen, die durch Interferenz den Gesamtstrahl in die gewünschte Richtung lenken.</p> <p>TRL58: <2019; MRL8: 2019; MRL9: 2019></p>
MEMS LiDAR (T08)	<p>MEMS-LiDAR nutzen Millimeter-kleine Spiegel auf Halbleiterbasis, um einen Laserstrahl in verschiedene Richtungen zu lenken. Das kleine Trägheitsmoment erlaubt eine sehr schnelle Bewegung des Spiegels wodurch das gesamte Field of View gescannt wird.</p> <p>MRL8: <2019; MRL9: 2020; MRL10: 2022</p>
OPA LiDAR (T09)	<p>Optical Phased Array LiDAR-Systeme sind mit Phased-Array-Radar-Systemen vergleichbar und arbeiten mit optischen Phasenmodulatoren, die die Geschwindigkeit des Laserlichts steuern. Wenn die Laser-Emitter alle synchron arbeiten, zeigt der resultierende Laserstrahl geradeaus, sind die Phasen der Emitter verschieden, wird der Strahl in einer Dimension entsprechend abgelenkt. Eine Gitteranordnung (Waveguide), die wie ein Prisma funktioniert, ändert die Richtung des Lichts basierend auf dessen Frequenz und erlaubt dadurch die Strahllenkung in der zweiten Dimension.</p> <p>MRL8: <2019; MRL9: 2022; MRL10: 2025</p>
Spinning LiDAR (T10)	<p>Spinning-LiDAR-Systeme ermöglichen ein 360° horizontales Field of View (FoV) indem mehrere Emitter-Detektor-Paare übereinander in Form einer Säule angebracht und anschließend um die eigene Achse gedreht werden. Dabei tastet ein kollimierter Laserstrahl Punkt für Punkt die Umgebung im Time-of-Flight Verfahren ab, woraus ein 3D-Pixel-Netz erstellt wird.</p> <p>MRL8: <2019; MRL9: 2019; MRL10: 2020</p>
Faserlaser (T11)	<p>Faserlaser werden derzeit vor allem in der Materialbearbeitung eingesetzt, da sie eine sehr viel höhere Leistung erbringen können als z. B. Diodenlaser. Inzwischen wird deren Anwendung aber auch im automobilen LiDAR-Bereich entwickelt (z. B. von der Firma Luminar).</p> <p>TRL2-4: <2017; TRL58: 2017; MRL8: 2017></p>

VCSEL (T12)	<p>Oberflächenemitter (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSEL) basieren ebenso wie Laserdioden auf Halbleitersubstrat. Im Gegensatz zu kantenemittierenden Laserdioden, emittieren VCSELs den Lichtstrahl senkrecht zum aktiven Bereich des Lasers und nicht parallel dazu. TRL58: <2017; MRL8: 2017; MRL9: 2017></p>
Silizium Photomultiplikator für 1550nm (T13)	<p>Silizium-Photomultiplikatoren (SiPM) bzw. MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) bestehen aus einem Array mehrerer SPADs und sind somit Halbleiterbauteile mit optischen Eigenschaften. Für den Einsatz mit 1550 nm Laserlicht, wird das Halbleitermaterial InGaAs benötigt. SiPM für 905 nm haben bereits MRL10 erreicht. TRL58: <2019; MRL8: 2019; MRL9: 2019></p>
Single Photon Avalanche Diode für 1550nm (T14)	<p>Pin-Photodioden sind Halbleiterelemente, die auf Basis ihres inneren Photoeffekts Licht in elektrischen Strom wandeln können. Dadurch eignen sie sich, um bei eintreffenden Photonen ein elektrisches Signal auszulösen. Avalanche Photodioden (APD) nutzen denselben Effekt und zusätzlich den Lawineneffekt. Dabei aktiviert ein durch den Photoeffekt erzeugter Ladungsträger weitere Ladungsträger, wodurch ein stärkeres Signal entsteht als bei pin-Photodioden. Die Single Photon Avalanche Diode (SPAD) ist eine Sonderform der APDs und kann durch ein Photon bereits mehrere Millionen Elektronen auslösen. SPADs werden bereits für 905 nm Systeme eingesetzt (MRL10), 1550 nm-geeignete SPADs auf Basis des Materials „InGaAs“ befinden sich in der Entwicklung. TRL58: <2019; MRL8: 2019; MRL9: 2019></p>
1550nm Wellenlänge (T15)	<p>In LiDAR-Systemen kann Laserlicht verschiedener Wellenlängen eingesetzt werden. Derzeit wird vor allem Licht mit einer Wellenlänge von 905 nm (NIR-Bereich) eingesetzt, da die Materialien dafür kostengünstig beziehbar und bereits aus anderen Branchen bekannt sind. Die 1550 nm Wellenlänge (SWIR-Bereich) kann bei 6x höherer Strahlungsenergie betrieben werden ohne die Augensicherheit zu gefährden, hat allerdings höhere Herstellungskosten. MRL8: <2019; MRL9: 2020; MRL10: 2023</p>
FMCW Laser (T16)	<p>Continuous Wave (cw)-Systeme senden ein kontinuierliches Signal aus, welches die Szene kontinuierlich beleuchtet. Dadurch können sie mit geringerer Leistung betrieben werden als gepulste Systeme. Frequenzmodellierete cw-LiDAR-Systeme (FMCW) verändern die Laserfrequenz im Laufe der Zeit, während die Amplitude gleich bleibt. Der Strahl ist in zwei Hälften geteilt, wobei eine Hälfte des Strahls in die Umwelt gesandt wird und bei der Reflektion mit der anderen Hälfte wieder vereint wird. Da der Quellstrahl eine sich ständig ändernde Frequenz aufweist, führt die zwischen den Strahlen verschiedene Laufdistanz zu unterschiedlichen Strahlfrequenzen. Dadurch entsteht ein Interferenzmuster dessen Frequenz der Umlaufzeit und damit der Umlaufdistanz proportional ist. TRL2-4: <2018; TRL58: 2018; MRL8: 2018></p>
Aktiv geschaltete Bildgebung (T17)	<p>Die Technologie der aktiv geschalteten Bildgebung (engl. Active Gated Imaging System, AGIS) besteht wie eine ToF-Kamera aus einem Bildsensor und einer Beleuchtungseinheit. Eine „Blende“ vor dem Sensor kann sehr schnell geöffnet und geschlossen werden (0,01-2 μs). Die Blende und die Beleuchtungseinheit werden so synchronisiert, dass die Blende nur dann kurz öffnet und schließt, wenn Licht aus einer bestimmten Distanz zurückgekehrt sein müsste (vorgeschaltete theoretische Laufzeitberechnung).</p>

Event-basiertes Sehen (T18)	<p>Hintergrundlicht gelangt daher erst gar nicht zu dem Bildsensor. Dadurch lässt sich die Umgebung in Szenen verschiedener Abstände unterteilen, welche jeweils ein sehr gutes Signal-Rausch-Verhältnis haben. TRL58: <2019; MRL8: 2019; MRL9: 2025; MRL10: 2025></p> <p>Eine konventionelle Kamera zeichnet eine Szene Bild für Bild auf. Dynamic Vision Sensoren (DVS) für das „Event-basierte Sehen“ (Event-based Vision) zeichnen stattdessen nur einzelne, spezifische Ereignisse auf. Ein Ereignis ist dabei eine lokale Änderung der Helligkeit, die von einem einzelnen Pixel erfasst wird. D. h. es werden nicht die gesamten Daten jedes einzelnen Bildes, sondern nur die Ereignisdaten aufgenommen. Ungenutzte Szenen, wie z. B. der Himmel, müssen nicht berechnet werden. Der resultierende Datenstrom ist eine Kette von asynchronen Ereignissen im einstelligen Mikrosekundentakt (geringe Latenz). Bisher wird DVS vor allem in der akademischen Forschung eingesetzt. TRL1: <2019; TRL2-4: 2020; TRL58: 2023; MRL8: 2026; MRL9: 2029; MRL10: 2033</p>
Hyperspektrale Bildgebung (T19)	<p>Ein digitales Farbfoto hat üblicherweise drei Kanäle (Rot, Grün, Blau). Zwischen 10 und 100 Kanälen spricht man von Hyperspektralkameras. Diese erfassen elektromagnetische Strahlung bestimmter Wellenlängen im Bereich zwischen ultravioletter und infraroter Strahlung (meist RGB & nahes Infrarot). Als Ergebnis erhält man z. B. die Funktionen Lichtintensität- oder Reflexionsgrad-vs.-Wellenlänge. Die Erfassung erfolgt entweder indem das gesamte Spektrum für einzelne Raumsegmente nacheinander (Spatial Scanning) oder indem der gesamte Raum nacheinander für einzelne Spektralkanäle erfasst wird (Spectral Scanning). TRL2-4: <2019; TRL58: 2019; MRL9: 2035; MRL10: 2035></p>
sCMOS (T20)	<p>Scientific CMOS (sCMOS) ist die Weiterentwicklung des CMOS-Bildsensors. Die CMOS-Technologie ist im Automobilsektor für die Umfelderkennung neben der CCD-Technologie bereits weit verbreitet. Für bessere Ergebnisse kühlen einige Hersteller die Geräte bis auf -20° C bis -40° C stark ab (Wasser oder Luft). Aufgrund der hohen Sensorkosten wird die sCMOS-Technologie bisher nur in der Wissenschaft oder für die Qualitätsprüfung in industriellen Produktionsanlagen eingesetzt. TRL1: <2019; TRL2-4: 2020; TRL58: 2026; MRL8: 2031; MRL9: 2035></p>
Thermografie mit Mikrobolometern (T21)	<p>Alle Objekte strahlen eine charakteristische Wärme- bzw. Infrarotstrahlung im elektromagnetischen Spektrum von ca. 0,9-14 µm aus, wobei die emittierte Strahlungsintensität mit der Temperatur steigt. Die Thermografie misst die Strahlung der Umgebung und erstellt daraus ein Videobild. Im Gegensatz zur aktiven Thermografie sind Wärmebildkameras passive Systeme, d. h. sie emittieren selbst keine Strahlung. Die Sensorelemente, die in Wärmebildkameras eingesetzt werden, heißen Mikrobolometer und erfassen Strahlung im langwelligen Infrarotbereich (FIR bzw. LWIR, 7,5-14 µm), dem für die Umfelderkennung relevanten Bereich. TRL2-4: <2019; TRL58: 2019; MRL8: 2023; MRL9: 2025; MRL10: 2025></p>
Piezokeramische Ultraschallwandler (T22)	<p>Beim Anlegen einer Spannung unter einer bestimmten Frequenz wird das Piezoelement angeregt und sendet Schallwellen aus. Bei Reflexionen in der Umgebung wird das Echo von dem Wandlerelement wieder in elektrische Energie und damit in ein digitales Signal umgewandelt. Das Messprinzip beruht auf dem Pulslaufzeitverfahren. MRL10: <2019</p>

pMUT (T23)	Im Gegensatz zu den derzeit für automobiler Fahrassistenzsysteme eingesetzten piezokeramischen Ultraschallsensoren werden piezoelektrische Ultraschallwandler (pMUT, von engl. „piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducers“) auf Halbleiterbasis mittels MEMS-Technologie hergestellt. In Standard-CMOS-Halbleiterfabriken werden sie dabei zusammen mit allen elektrischen Komponenten auf einem Chip gefertigt. TRL1: <2019; TRL2-4: 2022; TRL58: 2024; MRL8: 2025; MRL9: 2026; MRL10: 2026
Elektrische Aktuatoren (T24)	Ein Aktuator setzt Eingangs-Signale in mechanische Bewegungen um. Es zeigt sich ein deutlicher Trend zu elektrischen und elektromechanischen Aktuatoren auf dem Markt, da unter anderem die Anforderungen zur positionsgenauen und dynamischen Steuerung durch neue Antriebskonzepte steigen. MRL8: <2019; MRL9: 2021; MRL10: 2025
Hydraulische Aktuatoren (T25)	Ein Aktuator setzt Eingangs-Signale in mechanische Bewegungen um. Klassische Systeme arbeiten hydraulisch oder pneumatisch und kommen seit vielen Jahren, z. B. in der Motorsteuerung, zum Einsatz. MRL10: <2019
Brake-by-Wire (T26)	Das Brake-by-Wire System kommt ohne mechanische Verbindung aus und steuert den Bremsvorgang über elektronisch geregelte Aktuatoren. Die Bremsleistung kann dadurch an jedem einzelnen Rad optimal an die Straßenverhältnisse und die benötigte Bremsleistung angepasst werden, die mechanische Verbindung zu den Rädern entfällt. Das System ermöglicht eine effiziente, präzise und schnelle Regeldynamik. MRL8: <2019; MRL9: 2019; MRL10: 2025
Steer-by-Wire (T27)	Das Steer-by-Wire Konzept ersetzt die klassische mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Rad durch ein elektrisches System. Hierfür übermitteln Sensoren am Lenkrad die Steuerbewegung an Aktuatoren an den Rädern. Die mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Rad entfällt, so dass dadurch Package- und Kostenvorteile entstehen können. TRL58: <2019; MRL8: 2019; MRL9: 2025; MRL10: 2028
Chip-skalierte Atomuhr (T28)	Genaue Uhren sind für die GNSS-basierte Navigation (T35) unerlässlich, da die Satellitensignale Zeit-kodiert sind. Heutige Satelliten haben große und teure Atomuhren, die die sehr konstante Elektronenübergangsfrequenz zur Zeitmessung nutzen. Auf der Empfängerseite wird die Zeit durch weniger stabile Systeme wie Quarzkristall- und MEMS-Oszillatoren bereitgestellt, die unter Frequenzdriften leiden. Fortschritte bei der Miniaturisierung von Atomuhren ermöglichen deren Einsatz in anderen Anwendungen und erhöhen so die GNSS-Zuverlässigkeit. Chip-skalierte Atomuhren (chip-scaled atomic clocks, CSAC) können in MEMS-Fabriken hergestellt werden und sind sehr kompakt und stromsparend. TRL58: <2019
Halbleiterbasiertes Ring-Laser-Gyroskop (T29)	Ring-Laser-Gyroskope (RLG) bieten eine Alternative zu MEMS-basierten optischen Inertialsensoren. Mit der Einführung von "Photonic Integrated Circuits" werden RLGs auf Halbleiterbasis (Semiconductor RLG, SRLG) zu einer sinnvollen Alternative, da sie kostengünstig, stromsparend und kompakt sind. SRLGs verwenden einen kreisförmigen Resonanzhohlraum mit einem Halbleiterverstärkungsmedium. Das Verstärkungsmedium ist typischerweise AlGaAs oder InGaP mit Licht bei 1550 nm. TRL2-4: <2019; TRL58: 2021; MRL8: 2025; MRL9: 2028; MRL10: 2030

HD-Karten (T30)	<p>Hochauflösende (HD) Karten sind ein notwendiger Bestandteil für die Navigation autonomer Fahrzeuge. Das Grundprinzip ist, dass das Fahrzeug die Echtzeitbilder der Sensoren (LiDAR, Kamera, Radar) mit dem Bildmaterial der HD-Karten vergleicht und daraus die Position des Fahrzeugs ableitet. Durch die Identifizierung sogenannter Landmarken (Points of Interest, POI) kann eine submetergenaue Lokalisierung erreicht werden. Ein komplementärer Ansatz zur Verortung der POIs basiert auf Satellitendaten, wodurch deren Position zentimetergenau bestimmt werden kann.</p> <p>TRL1: <2019; TRL2-4: 2019; TRL58: 2020; MRL8: 2022; MRL9: 2023; MRL10: 2025</p>
M/NEMS-basierte Navigationssensoren (T31)	<p>Intertiale Messeinheiten (IMU) verwenden Trägheitssensoren, die Informationen über Gier-, Neigungs- und Rollraten sowie Längs-, Quer- und Vertikalbeschleunigungen liefern. Diese Sensoren werden bereits in kleinen Größen und kostengünstig auf Basis der bewährten MEMS-Technologie (T54) hergestellt. NEMS-basierte Sensoren (T56) sind kleiner, werden dadurch aber tendenziell ungenauer.</p> <p>MRL10: <2019</p>
Molekulare Uhr (T32)	<p>Im Gegensatz zu chipskalierten Atomuhren verwendet diese Technologie Moleküle und nicht Atome zur Zeitmessung. Indem Carbonylsulfidmoleküle einer bestimmten Frequenz elektromagnetischer Strahlung ausgesetzt werden, beginnen sich die Moleküle zu drehen. Dies kann gemessen und zur Ableitung der Zeit verwendet werden.</p> <p>TRL2-4: <2019</p>
WLAN-basierte Positionsbestimmung (T33)	<p>Es ist möglich ein Fahrzeug zu lokalisieren, indem man den Access Point von WLAN-Routern nutzt. Dabei wird die Distanz zwischen einem Router und dem Empfänger über die empfangene Signalstärke bestimmt. Bei der Nutzung von zwei Routern, deren Koordinaten bekannt sind, kann der Empfänger mittels Triangulation lokalisiert werden. Der automobiler Einsatz ist vor allem in Parkhäusern oder -plätzen denkbar.</p> <p>TRL2-4: <2019; TRL58: 2021; MRL8: 2025; MRL9: 2027; MRL10: 2030</p>
M-MIMO für Mobilfunk und Positionsbestimmung (T34)	<p>Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)-Systeme mit einer großen Anzahl von Basisstationsantennen (> 100) werden als Massive MIMO (M-MIMO) bezeichnet. M-MIMO wird auch für den neuen Mobilfunkstandard 5G eingesetzt. Full-Dimension MIMO, ein 3GPP-Standard, ist ein erster Schritt zu M-MIMO, der Dutzende von Antennen nutzt (4G-Netze).</p> <p>MRL8: <2019;</p>
Bodengestütztes dGNSS (T35)	<p>Neben SBAS (T36) können bodengestützte stationäre Referenzstationen die Genauigkeit satellitengestützter Navigation (GNSS) verbessern: dGNSS (differential GNSS) basiert auf Signalen zwischen 1) einem Satelliten und einer bodengebundenen Referenz- bzw. Basisstation, 2) dem Satelliten und einem Empfänger sowie 3) der Basisstation und dem Empfänger. Dabei ist die Position der Referenzstation exakt bekannt.</p> <p>MRL10: <2019</p>
EGNOS v3 für SBAS (T36)	<p>Zur Verbesserung der satellitengestützten Navigation (GNSS) werden zusätzliche ergänzende Systeme eingesetzt: EGNOS, WAAS, MSAS, GAGAN. Diese satellitenbasierten Erweiterungssysteme (Satellite based Augmentation System, SBAS) funktionieren durch eine Kombination aus geostationären Satelliten und Referenzstationen auf dem Boden. EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) ist ein europäisches</p>

Multi-Konstellations- und - Frequenzantennen (T37)	<p>SBAS und stellt neben verbesserten Positionsdaten auch Informationen zur Integrität des GNSS zu Verfügung. TRL2-4: <2019; MRL8: 2023; MRL9: 2025; MRL10: 2025</p> <p>Zur Verbesserung der satellitengestützten Navigation (GNSS) werden zusätzliche komplementäre Systeme, die Satellite Based Augmentation Systems (SBAS), eingesetzt. Die verschiedenen Satelliten- und SBAS-Systeme arbeiten auf verschiedenen Frequenzbändern. Die gleichzeitige Nutzung von Signalen mehrerer Satelliten verbessert die Genauigkeit der Lokalisierung. Daher sind Multi-Konstellations- und -Frequenz-Antennenempfänger für eine höhere Präzision erforderlich. TRL2-4: <2018; TRL58: 2018; MRL8: 2021; MRL9: 2021; MRL10: 2025</p>
Real Time Kinematics (T38)	<p>Mit der Real Time Kinematics (RTK)-Technologie kann eine sehr präzise Positionierung im mm-Bereich erreicht werden. RTK ist ähnlich wie dGNSS, verwendet aber nicht die von den Satelliten gesendeten Codes, sondern berechnet die Distanz auf Basis der empfangenen Trägerzyklen und der Wellenlänge des Signals. MRL10: <2019</p>
Software Defined Radio GNSS (T39)	<p>Um die Signale verschiedener GNSS-Satelliten auf den unterschiedlichen Frequenzen empfangen und verarbeiten zu können, kann die Hardwareleistung gesteigert werden, wobei dies teuer und aufwändig ist. Daher werden Software-basierte Lösungen (Software Defined Radio, SDR) entwickelt. TRL2-4: <2018; TRL58: 2018; MRL8: 2021; MRL9: 2023; MRL10: 2025</p>
THz Kommunikation mit 6G (T40)	<p>6G-Mobilfunk soll Durchsätze bis zu 400 Gbps bieten. 6G-Netze basieren auf Funkfrequenzen im THz-Bereich (0,1–10 THz). Wenn 4G-, 5G- und 6G-Netze gleichzeitig benutzt werden, ist ein reibungsloser Wechsel zwischen den Netzwerken wichtig. TRL1: <2019; TRL2-4: 2019; MRL8: 2030; MRL9: 2030></p>
URLLC (T41)	<p>Mit der Einführung des Mobilfunkstandards der fünften Generation (5G NR) hat die Internationale Fernmeldeunion drei Servicekategorien definiert: „massive machine-type communications“ (mMTC), „ultra reliable low latency communications“ (URLLC) und „enhanced mobile broadband“ (eMBB). Für das hochautomatisierte Fahren ist vor allem URLLC von Bedeutung, da hier sehr zuverlässige Signale (Ausfallrate $<10^{-5}$) mit möglichst geringer Latenz benötigt werden. URLLC definiert die Latenz auf maximal 1 ms. TRL58: <2019; MRL8: 2020; MRL9: 2024; MRL10: 2025</p>
5G NR für C-V2X (T42)	<p>Cellular vehicle-to-everything (C-V2X) ist ein Kommunikationsstandard, der von der 3GPP Vereinigung eingeführt wurde, um eine mobilfunkbasierte Kommunikation für kurze und lange Strecken zwischen Fahrzeugen und anderen Verkehrsteilnehmern zu ermöglichen. C-V2X besteht aus einer direkten Kommunikation und einer Netzwerkkommunikation. Im Nahbereich (direkte Kommunikation) steht die Technologie im Wettbewerb mit der WLAN-Technologie 802.11p. C-V2X arbeitet bisher auf Basis von 4G LTE, jedoch wird die Einführung von 5G New Radio (5G NR) die Leistung von C-V2X deutlich verbessern. TRL2-4: <2019; TRL58: 2022; MRL8: 2023; MRL9: 2024; MRL10: 2026</p>
IEEE 802.11bd Standard für ITS-G5 (T43)	<p>Der 2010 eingeführte Netzwerkstandard IEEE 802.11p definiert das WLAN in Fahrzeugumgebungen (wireless access in vehicular environments, WAVE) für die V2X-Kommunikation in Kurzstrecken Anwendungen. Der</p>

Lichtbasierte Kommunikation (T44)	<p>Standard für V2X-W-LAN wird aktuell unter der Bezeichnung IEEE 802.11bd überarbeitet.</p> <p>TRL58: <2019; MRL8: 2021; MRL9: 2024; MRL10: 2025</p> <p>Die Technologie nutzt die LED-Technologie für die optische Drahtloskommunikation: die sichtbare Lichtkommunikation (visible light communication, VLC; auch Li-Fi genannt). Werden die Lichtintensitätsstufen von LEDs oberhalb von 200 Hz geschaltet, nimmt das menschliche Auge einen konstanten Lichtstrahl wahr, während über die Schaltfrequenz Informationen übertragen werden können.</p> <p>TRL1: <2017; TRL2-4: 2017; TRL58: 2017></p>
mmWave 5G (T45)	<p>Die mmWave-Technologie ist ein Element des gesamten 5G-Netzwerkspektrums: Mit Frequenzen zwischen ca. 30 und 300 GHz (kurze mm-Wellenlängen) arbeitet mmWave in einem noch wenig genutzten Spektralband. 5G arbeitet jedoch auch in niedrigeren Frequenzbändern (5,9 GHz), die bereits von TV, Radio und 4G LTE genutzt werden.</p> <p>MRL8: <2019; MRL9: 2025; MRL10: 2027</p>
VANET (T46)	<p>Ein VANET (Vehicular Ad Hoc Network) ist ein dezentrales mobiles Ad-hoc-Netzwerk, in dem Fahrzeuge (On-Board Units, OBU) und Road-Side Units (RSU) die Knoten darstellen. Es umfasst die Kommunikation zwischen Fahrzeugen (V2V) und Fahrzeugen zu RSUs (V2I). VANETs können auf verschiedenen drahtlosen Kommunikationssignalen basieren; in der Regel nutzen sie IEEE 802.11p oder Mobilfunknetze. Als Übertragungsprotokoll hat sich Protokoll „Ad-Hoc on-Demand Distance Vector“ als besonders geeignet qualifiziert.</p> <p>TRL2-4: <2019; TRL58: 2019; MRL8: 2019></p>
CAN FD (T47)	<p>CAN (Controller Area Network) stellt derzeit die Basis zur fahrzeuginternen Kommunikation dar und ermöglicht Bandbreiten bis zu 1 Mbyte/s. Eine Weiterentwicklung der Technologie „CAN FD“ (Flexible Data-Rate), die 2012 von Bosch eingeführt wurde, ermöglicht einen Datendurchsatz bis 5 Mbyte/s und eine geringere Latenz als das Standard-CAN. Daher ist zu erwarten, dass CAN von CAN-FD abgelöst wird.</p> <p>TRL58: <2019; MRL8: 2020; MRL9: 2021; MRL10: 2022</p>
Kupferbasiertes Automotive-Ethernet (T48)	<p>Aktuelle Technologien zur fahrzeuginternen Kommunikation sind nicht in der Lage, ausreichend hohe Bandbreiten bereitzustellen: Mit der Einführung der ADAS-Funktionen (Advanced Driver Assistance Systems) erzeugen die benötigten Sensoren hohe Datendurchsätze. Die Ethernet-Technologie bietet hohe Bitraten, wodurch eine Anwendung im Automobilbereich besonders attraktiv wird. Ethernet mit kupferbasierten Fasern ist bereits in verschiedenen Fahrzeugen implementiert.</p> <p>MRL10: <2019</p>
Optisches Automotive-Ethernet (T49)	<p>Die Ethernet-Technologie bietet hohe Bitraten, wodurch eine Anwendung im Automobilbereich besonders attraktiv wird. Das „optische Ethernet“, basiert auf Glasfasern statt Kupferkabeln und wird in Branchen wie der IT oder Telekommunikation bereits angewendet.</p> <p>TRL1: <2019; TRL2-4: 2021; TRL58: 2023; MRL8: 2025; MRL9: 2026; MRL10: 2028</p>
Serviceorientierte Architektur (T50)	<p>Bei der Serviceorientierten Architektur (SoA) werden Funktionen als Dienste bzw. Service definiert und sind mit einer Aktivität verknüpft. Sie haben eine einheitliche Schnittstelle und sind in sich geschlossen. Ein</p>

	<p>Service kann einen anderen aufrufen, ohne dabei zu wissen wie dieser funktioniert. Bekannt ist nur, dass der Service vorhanden ist (Service Directory), wie man ihn aufruft, welche Eingabedaten benötigt werden und welcher Art das Ergebnis ist.</p> <p>TRL58: <2019; MRL8: 2022></p>
Vehicle Cloud Computing (T51)	<p>Bei „Vehicle Cloud Computing“ handelt es sich um eine automotiv elektrische/ elektronische (E/E) Architektur und um eine Weiterentwicklung des Vehicle Computing. Dabei werden Cloud-Dienste nahtlos integriert und zunehmend Fahrzeugfunktionen in die Cloud ausgelagert. Im Fahrzeug werden nur noch wenige zentrale Rechenplattformen (Vehicle Computer) benötigt.</p> <p>TRL58: <2025; MRL8: 2025; MRL9: 2025></p>
Vehicle Computing (T52)	<p>Das „Vehicle Computing“ nutzt domänenunabhängige (zonale), heterogene und vor allem leistungsfähige Zentralrechner, welche in der Regel als System-on-a-Chip (SoC) realisiert sind. Die höhere Datenrate zwischen den Rechnern erfordert den Einsatz einer Ethernet-Datenübertragung.</p> <p>MRL8: <2019; MRL10: 2025</p>
EUV-Lithographie (T53)	<p>In den letzten Jahren haben die Chiphersteller vor allem die Immersionslithographie mit einer Belichtungswellenlänge von 193 nm eingesetzt. Chipstrukturen unterhalb von 10 nm können aber mit einer neuen Art Lithographieprozess weitaus kosteneffizienter erreicht werden als mit der Immersionslithographie: die EUV-Lithographie (EUVL), die durch Laserpulsexposition erzeugte Plasmastrahlung mit einer Wellenlänge von 13,5 nm als Strahlungsquelle nutzt. Die nächsten Technologieknoten sind 7 nm und 5 nm.</p> <p>TRL2-4: <2019; TRL58: 2019; MRL8: 2022; MRL9: 2023; MRL10: 2023</p>
MEMS (T54)	<p>MEMS kombinieren mikromechanische und elektrische (sowie optische) Strukturen in Systemen im Bereich von wenigen μm. Sie werden in der Regel in CMOS-Fabriken auf Silizium hergestellt. Die Kombination der integrierten Schaltung und der MEMS kann als hybride Struktur (MEMS und CMOS auf verschiedenen Substraten) oder monolithisch (auf dem gleichen Substrat, System-on-a-Chip) gestaltet werden.</p> <p>MRL10: <2019</p>
More (than) Moore: SoC und SiP (T55)	<p>More-Moore folgt der Miniaturisierung von Chips und geht damit mit dem Moore'schen Gesetz einher. Damit verbunden sind die Entwicklungen in der CMOS-Technologie zur Halbleiterproduktion im unteren nm-Bereich und die Integration verschiedener informationstechnischer Funktionen auf einem einzigen Chip (System-on-a-Chip, SoC). More-than-Moore stellt dagegen die Diversifikation anstelle der Miniaturisierung in den Vordergrund. Nicht digitale Elemente bzw. Funktionen (Sensoren und Aktuatoren) werden Teil des Pakets (System-in-a-Package, SiP).</p> <p>TRL2-4: <2019; TRL58: 2020; MRL8: 2022; MRL9: 2024; MRL10: 2025</p>
NEMS (T56)	<p>Nanoelektromechanische Systeme (NEMS) sind die Weiterentwicklung von MEMS. Basierend auf dem Fortschritt der Halbleiterfertigung in Richtung nm-Bereiche werden MEMS in Zukunft noch kleiner hergestellt: Im Bereich von <100 nm werden die Systeme NEMS genannt.</p> <p>TRL1: <2019; TRL2-4: 2023; TRL58: 2026; MRL8: 2028; MRL9: 2029; MRL10: 2031</p>

Photonic Integrated Circuit (T57) Photonisch integrierte Schaltkreise (Photonic Integrated Circuits, PICs) verbinden mehrere Subkomponenten auf einem einzigen Chip: Neben der Elektronik (Schalter, Transistoren etc.) können Laserquellen, Filter, Detektoren, Modulatoren, Strahlteiler und/oder Verstärker integriert werden. Die Entwicklung von PICs wird durch einige andere Technologien unterstützt: mikrooptoelektromechanische Systeme (MOEMS), integrierte Optik, intelligente Materialien und Quantenphotonik.
TRL58: <2019; MRL8: 2020; MRL9: 2022; MRL10: 2024

Quelle: Eigene Zusammenstellung, zum Teil bereits in Ulrich et al. (2020) veröffentlicht [449]

Tabelle L.4: Teilnehmende der Delphi-Befragung

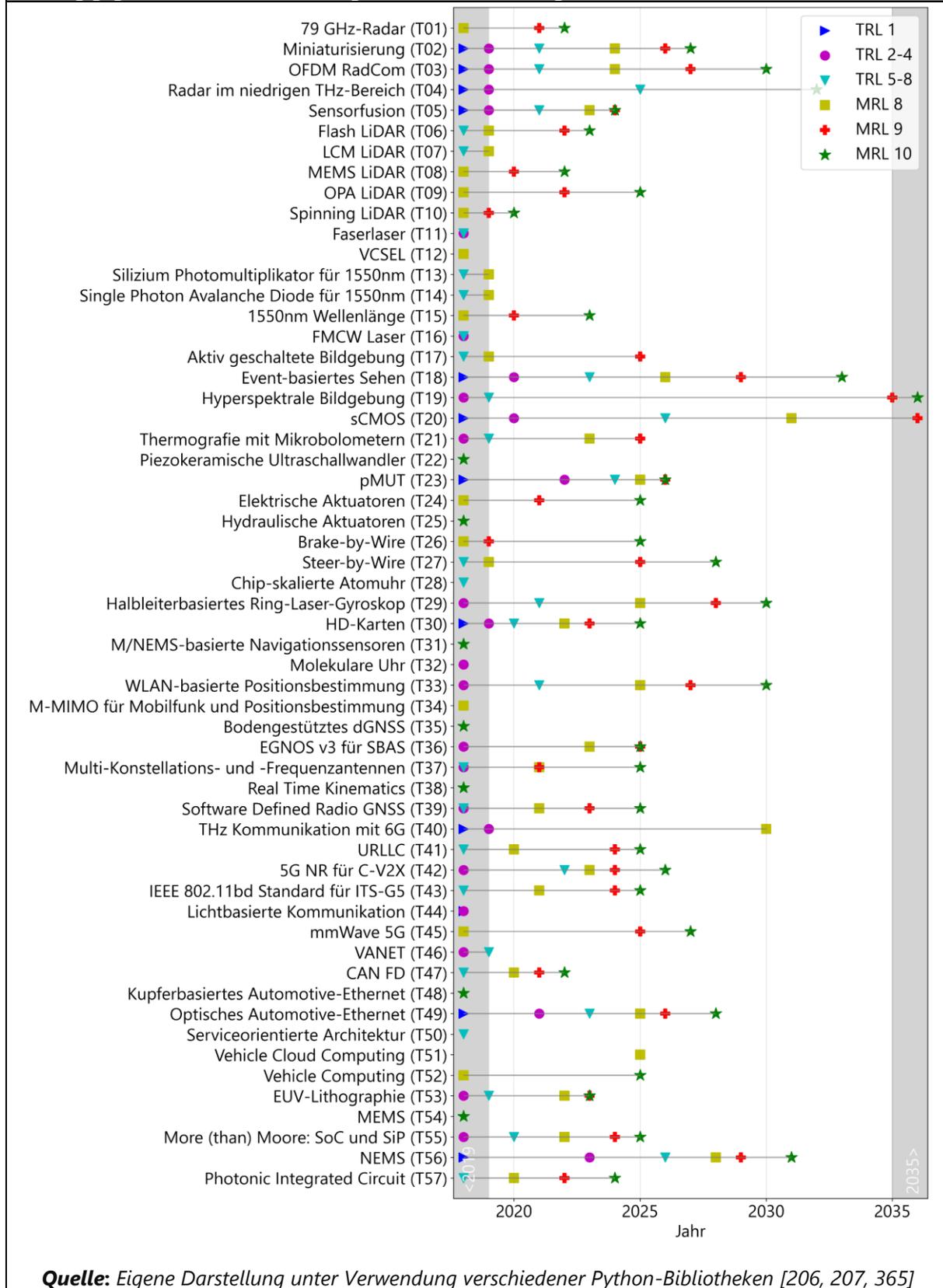
Abkürzungen: Elektrik/Elektronik (EE), Deutschland (DE), Niederlande (NL), Italien (IT), Spanien (ES), Südkorea (KR)

Be-fragte/r	Delphi-Runde	Expertise	Berufser-fahrung [Jahre]	Branche	Herkunft
X01	1 & 2	EE, Kommunikation	10	Wissenschaft	DE
X02	1 & 2	EE, Kommunikation	20	Industrie	DE
X03	1 & 2	EE, Kommunikation	10	Wissenschaft	DE
X04	1 & 2	Photonik, Mikrosystemtechnik	40	Industrie	DE
X05	1 & 2	Photonik, Mikrosystemtechnik	20	Industrie	DE
X06	1 & 2	Sensorik, Positionierung, Photonik	20	Industrie	DE
X07	1 & 2	Sensorik	k. A.	Industrie	DE
X08	1 & 2	Sensorik	30	Wissenschaft	DE
X09	1 & 2	Mikrosystemtechnik	k. A.	Industrie	NL
X10	1	Aktuatorik, by-Wire	k. A.	Industrie	IT
X11	1	Mikrosystemtechnik	k. A.	Wissenschaft	ES
X12	1	Sensorik	40	Industrie	DE
X13	1	Navigation und Positionierung	k. A.	Wissenschaft	KR
X14	1	Kommunikation	k. A.	Industrie	DE
X15	1	Sensorik, Kommunikation	30	Industrie	DE

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Abbildung L.1: Roadmap aller Technologien mit Relevanz für die Automatisierung

Die zeitliche Entwicklung wurde in der im Jahr 2020 durchgeführten Delphi-Befragung ermittelt (Kapitel 6.1.2 bzw. Tabelle L.3); wenn ein Reifegrad nicht dargestellt ist, konnte hierzu keine zeitliche Einschätzung ermittelt werden; konnte die weitere zeitliche Entwicklung nicht ermittelt werden, endet die Darstellung gegebenenfalls vor Erreichung von MRL10; die Reifegrade sind in Tabelle 4.7 definiert



Quelle: Eigene Darstellung unter Verwendung verschiedener Python-Bibliotheken [206, 207, 365]

M Bewertungsgrundlage der Analyse zum disruptiven Potenzial

<i>Tabelle M.1: Erfüllungsfragen zu den Kriterien potenzieller Disruptivität; Quellengrundlage in Tabelle 4.8</i>		
ID	Kriterium	Erfüllungsfrage
D01	Eigentumsverhältnisse	In welchem Maß werden neue Eigentumsverhältnisse durch die Einführung des PDFK möglich?
D02	Erster Markt	Welcher Markt wird von dem PDFK zunächst adressiert? Ein Fahrzeugkonzept mit hohem disruptivem Potenzial wird in einem kleinen Markt mit eindeutigen Anforderungen eingeführt und entwickelt sich von dort in andere Märkte ähnlicher Anforderungen hinein, bis es zuletzt weitere größere Märkte anderer Anforderungen erreicht (gemäß den Erkenntnissen in <i>The Innovator's guide to growth</i> von S. D. Anthony, einem Co-Autor von C. M. Christensen).
D03	Geschäftsmodelländerung	In welchem Maß werden neue Geschäftsmodelle durch die Einführung des PDFK möglich?
D04	Wachstumschancen	Inwieweit ist das PDFK geeignet sich auf anderen Märkten mit anderen (Kunden- und nationalen) Anforderungen zu etablieren? Ein Fahrzeugkonzept, das sich ausgehend vom ersten Markt ohne signifikante Änderungen auch auf anderen nationalen wie internationalen Märkten mit anderen Anforderungen etablieren kann, hat für dieses Kriterium ein hohes disruptives Potenzial.
D05	Aufgabenerfüllung	Inwieweit ist die aktuelle Kundengruppe mit der Erfüllung der Aufgabe bzw. des Problems zufrieden, das von dem PDFK verbessert oder gelöst werden soll? Das Kriterium bezieht sich weniger auf ein PDFK als auf den Status quo den es zu ersetzen versucht.
D06	Umstellungsaufwand	Wie hoch ist der Aufwand für die Umstellung vom etablierten Status quo zur Einführung des PDFK? Aufwand z. B. bezüglich Kosten und Organisation
D07	Funktionalität	Werden durch das PDFK neue Funktionen möglich? Funktionen entsprechen nicht Leistungsvorteilen
D08	Initiale Leistungsnachteile	Wie hoch sind die Leistungsnachteile des PDFK gegenüber konventionellen Lösungen bei den Hauptanforderungen der etablierten Kunden? Durch die Nachteile interessieren sich Status quo-Hauptkunden zunächst nicht für das PDFK; die Nachteile werden bei einer erfolgreichen Disruption im zeitlichen Verlauf verbessert, sodass später auch Status quo-Kundenanforderungen befriedigt werden und das PDFK mehr Marktanteile erobern kann. Dieses Kriterium folgt unter anderem C. M. Christensens Standardwerk <i>The Innovator's Dilemma</i> .

D09	Vorteile bei neuen Leistungskriterien	Welche Vorteile bei anderen, neuen Leistungskriterien, die zunächst nur für Kunden aus Randgruppen bzw. einem Nischenmarkt von Bedeutung sind, bietet das PDFK? Später verschieben sich die Leistungsanforderungen des Gesamtmarkts hin zu den neuen Vorteilen; bekannte disruptive Technologien aus der Literatur waren billiger, (im Betrieb) einfacher, kleiner, leichter, flexibler und praktischer, zuverlässiger und/oder effizienter. Vor allem der geringere Preis und Vereinfachungen sind wiederkehrende Merkmale.
D10	Etablierte Konkurrenz	Wie gehen etablierte Unternehmen mit dem PDFK um? Kriterium unter anderem entsprechend Christensens Standardwerk The Innovator's Dilemma, in dem festgestellt wurde, dass historische Disruptionen durch Innovationen stattgefunden haben, die zu Beginn von etablierten Unternehmen ignoriert wurden.
D11	Marktdiffusion	Kann sich das PDFK einfach im Zielmarkt verbreiten? Eine einfache Diffusion resultiert in einer starken Verankerung des PDFK im Markt, wodurch sein disruptiver Charakter verstärkt wird; dazu gehört auch der Zugang zu strategischen Ressourcen wie Lizenzen.
D12	Technologische Diskontinuität	Kann die etablierte Lösung mit technologischem Fortschritt den durch das PDFK verursachten Sprung überwinden?
D13	Infrastrukturabhängigkeit	Bedarf das PDFK neuer Infrastruktur oder ist es mit der vorhandenen Infrastruktur kompatibel?
D14	Umfeldabhängigkeit	Ist das PDFK von externen Umfeldeinflüssen abhängig? z. B. von Politik, Makroökonomie, gesellschaftliche Trends, Verbände, Zulassung, Normung etc.
D15	Schadensrisiko	Ist das PDFK anfällig für technische Störungen mit hohem Schadensausmaß? Treten technische Störungen mit gravierenden Schadensfolgen inklusive Personenschäden auf, kann dies die Akzeptanz des PDFK grundlegend beeinträchtigen und damit einem disruptiven Ereignis entgegenwirken (z. B. Unglück des Luftschiffs Hindenburg). Das Schadensrisiko ist das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit (Störanfälligkeit) und Schadensausmaß.

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Tabelle M.2: Operationalisierung der Kriterien potenzieller Disruptivität

Nur die Punktzahlen 0, 2 und 4 werden in folgender Tabelle operationalisiert; liegen Fahrzeugkonzepte dazwischen, werden sie mit 1 respektive 3 bewertet; Quellengrundlage in Tabelle 4.8; Erklärungen der Kriterien in Form von Erfüllungsfragen in Tabelle M.1; die Abkürzung PDFK bezeichnet potenziell disruptive Fahrzeugkonzepte

ID	Erfüllungsgrad	kein disruptives Potential (0)	wenig disruptives Potential (2)	hohes disruptives Potential (4)
D01	PDFK ... Eigentumsverhältnisse.	nutzt unveränderte	erlaubt leicht veränderte	erlaubt radikal andere
D02	PDFK adressiert zunächst ...	mehrere große Märkte.	mehrere kleine Märkte.	einen kleineren Markt.
D03	PDFK ... Geschäftsmodell.	nutzt unverändertes	erlaubt leicht verändertes	erlaubt radikal anderes
D04	PDFK ...	kann nur dem ersten Markt sehr ähnliche Märkte adressieren.	bedarf großer Anpassungen, um in andere Märkte wachsen zu können.	kann mit kleinen Änderungen viele verschiedene neue Märkte erreichen.
D05	Von PDFK adressierte "Aufgabe" wird aktuell aus Kundensicht ... erledigt.	perfekt	gut, teilweise nur befriedigend	ausreichend oder mangelhaft
D06	Umstellung von etablierter Lösung zum PDFK bedarf ... Aufwand.	hohen	mittleren	geringen oder keinen
D07	PDFK erlaubt ... Funktionen.	keine neuen	leicht veränderte	(völlig) neue/ andere
D08	PDFK hat ... Leistungsnachteile.	keine	geringe	signifikante
D09	PDFK bietet ... Vorteile.	kaum	wenige	viele
D10	Die etablierten Unternehmen ...	setzen PDFK sofort selbst um.	beobachten PDFK.	ignorieren PDFK.
D11	PDFK erfährt ...	starke Marktbarrieren, die eine Verankerung des PDFK im Markt verhindern.	eine langsame bzw. unvollständige Diffusion behindert durch Marktbarrieren.	eine schnelle Diffusion ohne Marktbarrieren.
D12	Ein Überwinden ist ... möglich.	mit geringem Aufwand bzw. kleinen Veränderungen	nur mit hohem Aufwand bzw. radikalen Veränderungen	wirtschaftlich und strategisch nicht sinnvoll
D13	PDFK ...	benötigt neue oder zusätzliche Infrastruktur.	ist weitgehend kompatibel mit vorhandener Infrastruktur.	ist voll kompatibel mit vorhandener/ unabhängig von Infrastruktur.

D14	Es existiert eine ...	hohe Abhängigkeit.	gewisse Abhängigkeit, bei der die Einführung des PDFK bei positiven Umwelteinflüssen beschleunigt, bei negativen aber dennoch durchsetzen kann.	hohe Unabhängigkeit.
D15	PDFK hat ... Schadensrisiko.	hohes	mittleres	geringes oder kein

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Tabelle M.3: Begründungen für die Bewertung des disruptiven Potenzials

Zuordnung der ID zu den Kriterienbezeichnungen in Tabelle M.4; Akronyme der Fahrzeugkonzepte bzw. -klassen werden entsprechend Kapitel 2 verwendet (otri-ci: Van ; otri-ci*: RoboVan , otri-fm: Flex ; otri-im: Mover ; otrm-ibm: iMod ; otrm-sam: U-Shift ); Abkürzungen: on-the-road integral (otri); on-the-road modular (otrm); conventional integral (ci); flexible mover (fm); integral mover (im); infrastructure-based modular (ibm); standalone modular (sam); PDFK: potenziell disruptives Fahrzeugkonzept

ID	Begründung
D01	Die on-the-road modularen (otrm) FK sam und ibm bieten die Möglichkeit, dass unterschiedliche Akteure die Fahr- und Transporteinheiten getrennt voneinander besitzen können. Perspektivisch könnten Fahreinheiten im Besitz von Flottenbetreibern, gewerblichen Instanzen oder Privatpersonen sein und bei Nichtnutzung als Transport-as-a-Service an Akteure vermietet werden, die eine Transporteinheit mit Gütern oder Personen bewegen wollen. Bei den fm FK können einzelne Module ebenfalls verschiedene Eigentümer haben und zu physischen Platoons gekoppelt werden, um so größere Transporteinheiten zu bilden. Bei den anderen FK ändern sich die Eigentumsverhältnisse gegenüber dem Status quo voraussichtlich nicht.
D02	Die modularen (otrm) FK sind konzeptinhärent für die Anwendung in mehreren Einsatzzwecken zugleich gedacht. Daher wird ein modulares Fahrzeugkonzept voraussichtlich zunächst in mehreren kleineren Märkten eingeführt. Die otri FK sind für individuelle Einsatzzwecke entwickelt und können damit auch erst in einem einzigen kleineren Markt eingeführt werden. Der fahrerlose Status quo (ci*) kann voraussichtlich in denselben Märkten eingesetzt werden wie der Status quo und ist damit voraussichtlich weniger eingeschränkt als die übrigen neuartigen Fahrzeugkonzepte. Entsprechend den Erkenntnissen in The Innovator's guide to growth von S. D. Anthony, einem Co-Autor von C. M. Christensen, hatten historisch solche Innovationen ein höheres disruptives Potenzial, die zunächst in einzelnen kleinen Märkten eingeführt wurden.
D03	Für dieses Kriterium werden unter anderem Erkenntnisse aus der Umfeldanalyse und der Synthese der Einsatzszenarien berücksichtigt: Durch die Vollautomatisierung der Fahrzeuge entstehen neue Geschäftsmodelle, z. B. im Bereich der Orchestrierung vernetzter, fahrerloser Flotten, aber auch im Betrieb der fahrerlosen Flotte per Fernüberwachung und gegebenenfalls manuellem Fernzugriff. Große Flottenbetreiber werden

Wettbewerbsvorteile gegenüber kleineren Transportunternehmen und vor allem selbstständigen Kraftfahrern und Kraftfahrerinnen haben. Noch deutlicher wird die Änderung bei Einführung modularer Fahrzeugkonzepte: neben den Fahreinheiten müssen die Transporteinheiten überwacht, gewartet und disponiert werden. Dienstleister können entstehen, die diese Aufgaben für die unterschiedlichen Stakeholder, die Transporteinheiten besitzen, übernehmen. Bei Infrastruktur-basierter Modularisierung können weitere Betreiber entstehen die die Modulwechsel per Infrastruktur übernehmen.

- D04 Durch die flexible Kopplung verschiedener Module (fm) bzw. Transporteinheiten (otrm) können on-the-road modulare (otrm: sam und ibm) Fahrzeugkonzepte sowie flexible Mover (fm) mit geringen Änderungen durch neue Transporteinheiten bzw. Module verschiedene andere Märkte/ Einsatzzwecke bedienen. Bei ci* und im bedarf es höherer Anpassungen.
- D05 Dieses Kriterium bezieht sich auf den Status quo der eingesetzten Fahrzeuge, anstatt auf die neuartigen Fahrzeugkonzepte. Im Bereich der Güterlogistik sind unter anderem kein ebenerdiges Entladen, Verkehrsbelastung und mehrere Zustellversuche durch den Status quo weniger gut erfüllte Kriterien. Dagegen ist der Status quo bezüglich Lieferketten, Infrastruktur sowie Ladehilfsmittel kompatibel und ist fahrzeugtechnisch den Anforderungen entsprechend hoch entwickelt. Im öffentlichen Personentransport steht die Daseinsvorsorgepflicht der geringen Auslastung gegenüber. Die ÖPNV Angebote sind wenig flexibel und benötigen infrastrukturell angepasste Haltestellen für einen barrierefreien Zugang.
- D06 Da das ci* Fahrzeugkonzept dem Status quo weitestgehend entspricht, ist bei der Umstellung im Vergleich zu den anderen neuartigen Fahrzeugkonzepten nahezu kein Aufwand notwendig. Die übrigen integralen Fahrzeugkonzepte bedürfen mehr Umstellungsaufwand während otm-sam sowie -ibm (modulare Fahrzeugkonzepte) durch geänderte Logistikkonzepte (abgekoppelte Transporteinheiten) und bei ibm zusätzlich benötigter Infrastruktur einen erheblichen Umstellungsaufwand bedeuten.
- D07 Die on-the-road modularen Fahrzeugkonzepte sam und ibm nutzen Transporteinheiten, die abgekoppelt von der Fahreinheit einen Großteil der Zeit stillstehen. Dadurch können sie gezielt für ergänzende Services genutzt werden: z. B. eine Anbindung ans Stromnetz für Smart Grid Erlöse, für Werbezwecke oder als Aufenthaltsort bei Personen-Transporteinheiten. fm-Fahrzeugkonzepten können durch die physische Kopplung von Modulen Waren und Güter zwischen den Modulen verschieben und so während der Fahrt konsolidieren. ci* und im-Fahrzeugkonzepte ermöglichen im Vergleich dazu kaum neue Funktionalitäten gegenüber des Status quos.
- D08 Für dieses Kriterium werden die Ergebnisse der Analyse der Nutzenkriterien in den vorherigen Kapiteln dieser Arbeit herangezogen. Die Nutzwerte der 10 am relevantesten in der Online-Umfrage gewichteten Nutzenkriterien werden summiert. Der fahrerlose Status quo hat dabei einen etwas geringen Teilnutzwert als der Status quo als Referenz; es folgen in absteigender Reihenfolge sam, im, fm und ibm. Entsprechend wird das disruptive Potenzial für dieses Kriterium bewertet. Gemäß C. M. Christensens Standardwerk The Innovator's Dilemma hatten disruptive Innovationen, zunächst signifikante Nachteile in den Hauptanforderungen der etablierten Kunden.
- D09 Für dieses Kriterium werden unter anderem die Ergebnisse der Detailanalysen RCO und LCA für den Status quo sowie die ci*- und sam-Fahrzeugkonzepte herangezogen. Unter anderem bedeutet dabei die Einsparung von Fahrpersonal bei allen fahrerlosen Fahrzeugkonzepten eine Kostenreduktion. Weitere Vorteile vor allem beim fm-, ibm- und sam-Fahrzeugkonzepten sind die hohe Flexibilität durch Platoons bzw. die on-the-road Modularisierung.

- D10 Die ci*-Fahrzeugkonzepte (fahrerloser Status quo) werden von etablierten OEM und Zulieferern vorangetrieben; für im-, ibm- und sam-Fahrzeugkonzepte haben viele etablierten Unternehmen bereits Ideen, Konzeptstudien oder reale Demonstratoren vorgestellt. Flexible Mover werden dagegen weitestgehend von etablierten Unternehmen ignoriert. Je weniger die etablierten Unternehmen das PDFK beachten, desto höher dessen disruptives Potenzial - dies geht aus den ex-post Beobachtungen von C. M. Christensen (The Innovator's dilemma) hervor.
- D11 Das fahrerlose Pendant des Status quo erfährt wenig Marktbarrieren und kann sich potenziell schnell im gleichen Markt wie der Status quo verbreiten. Der Status quo ist fest in den Logistik- und Lieferprozessen integriert und gegenseitig abgestimmt. Eine Einführung von Fahrzeugkonzepten die mehr Warenumschnitte oder Konsolidierungszentren benötigen, steht vor großen Marktbarrieren (fm, im, sam, ibm). Im Personentransport etwas weniger stark als im Gütertransport. Die zusätzlich benötigte Infrastruktur erschwert eine schnelle Marktdiffusion der ibm Fahrzeugkonzepte.
- D12 Die Trennung von Fahr- und Transporteinheit sowie der modulare Wechsel on-the-road stellt eine große technologische Diskontinuität für integrale Status quo-Fahrzeuge dar. Zusätzlich bedeutet das fahrerlose Fahren einen erheblichen technologischen Sprung gegenüber manuell geführter Status quo-Fahrzeuge, welcher entsprechend der Erkenntnisse im Kapitel prospektiver Technologieverfügbarkeit signifikanten und langfristigen Entwicklungsaufwand bedarf.
- D13 Alle fahrerlosen Fahrzeugkonzepte benötigen für die Automatisierung eine Absicherung im Backend sowie eine Kommunikationsinfrastruktur für den Austausch mit diesem. ci*-Fahrzeuge sind kompatibler mit der bestehenden physischen Infrastruktur (z. B. Laderampen oder Stellplatzgröße) als fm-, im-, ibm- und sam-Alternativen, da sie ci-Fahrzeugen sehr ähnlich sind (Status quo). ibm-Konzepte benötigen zusätzliche Infrastruktur für den Wechsel von Transporteinheiten.
- D14 Bei fm-, sam- und ibm- Fahrzeugkonzepten ändern sich innerstädtische Lieferprozesse grundlegend. Diese werden vor allem dann umgesetzt werden, wenn politischer Wille diese forciert; z. B. durch striktere Lieferzeitfenster oder Zufahrtsbeschränkungen. im- und ci*-Fahrzeugkonzepte operieren ähnlich zum Status quo, wodurch deren Einführung weniger von externen Umwelteinflüssen abhängt. Allen Fahrzeugkonzepten gemein ist die politische und normative Abhängigkeit bei der Einführung des vollautomatisierten Fahrens.
- D15 Fahrerloses Fahren kann bei technischen Störungen gravierende Auswirkungen inklusive Personenschaden haben, wobei die statistisch häufigste Unfallursache menschliche Fehler sind. Zusätzlich führen die Modularisierung (otrm) sowie Flexibilisierung (fm) zu beweglichen Komponenten, welche zum einen ausfallen können und zum anderen das Risiko weiterer Personenschäden (wenn auch weniger gravierend) bergen. Bei ibm-Fahrzeugkonzepten unterliegt die benötigte Infrastruktur zusätzlicher Störanfälligkeit.

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Tabelle M.4: Bewertung des disruptiven Potenzials neuartiger Fahrzeugkonzepte; Begründungen der Bewertungen in Tabelle M.3

ID	otri-ci* RoboVan	otri-fm Flex	otri-im Mover	otrm-ibm iMod	otrm-sam U-Shift
D01	0	2	0	4	4
D02	1	4	4	3	3
D03	2	2	2	4	4
D04	1	3	2	3	3
D05	2	2	2	2	2
D06	3	2	2	0	1
D07	1	2	1	4	4
D08	1	3	3	4	2
D09	1	2	1	3	3
D10	0	3	1	2	2
D11	3	2	2	1	2
D12	1	3	2	4	4
D13	3	2	2	0	2
D14	3	1	3	1	1
D15	2	1	2	0	1
Summe	24	34	29	35	38

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Lebenslauf

Persönliche Daten

Nachname, Vorname Ulrich, Christian

Geburtsdatum 29.05.1992

Geburtsort Aalen

Schulbildung

2002 – 2011 Kopernikus Gymnasium Wasseralfingen

Allgemeine Hochschulreife

Hochschulbildung

2011 – 2018 Universität Stuttgart

Technologiemanagement (B. Sc. und M. Sc.)

2020 – 2024 Universität Stuttgart

Promotionsstudent an der Fakultät 7 „Konstruktions-,
Produktions- und Fahrzeugtechnik“

Berufliche Tätigkeit

2018 – 2024 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.

Institut für Fahrzeugkonzepte, Stuttgart

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

seit 2024

Carl Zeiss AG

Corporate Research and Technology, Oberkochen

Innovation Scout